



**TUGAS AKHIR - TE141599**

**PENEMPATAN OPTIMAL KAPASITOR DENGAN  
MEMPERHATIKAN STABILITAS TEGANGAN AKIBAT  
PENAMBAHAN PEMBANGKIT DAN BEBAN DI KALIMANTAN  
SELATAN-TENGAH TAHUN 2021 BERDASARKAN RUPTL**

Rizqi Aditya Pradana  
NRP 2215105059

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Sjamsjul Anam MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PENEMPATAN OPTIMAL KAPASITOR DENGAN  
MEMPERHATIKAN STABILITAS TEGANGAN AKIBAT  
PENAMBAHAN PEMBANGKIT DAN BEBAN DI  
KALIMANTAN SELATAN-TENGAH TAHUN 2021  
BERDASARKAN RUPTL**

**Rizqi Aditya Pradana  
NRP 2215105059**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Sjamsjul Anam MT.**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018**





**FINAL PROJECT - TE 141599**

**OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENT CONSIDERING  
VOLTAGE STABILITY IN RESULT OF INCREASING  
GENERATOR AND LOAD ON SOUTH-CENTRAL BORNEO  
2021 BASED ON RUPTL**

**Rizqi Aditya Pradana  
NRP 2215105059**

**Advisor  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Sjamsjul Anam MT.**

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018**



## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “PENEMPATAN OPTIMAL KAPASITOR DENGAN MEMPERHATIKAN STABILITAS TEGANGAN AKIBAT PENAMBAHAN PEMBANGKIT DAN BEBAN DI KALIMANTAN SELATAN-TENGAH TAHUN 2021 BERDASARKAN RUPTL” adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2018

Rizqi Aditya Pradana  
NRP. 2215105059

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**PENEMPATAN OPTIMAL KAPASITOR DENGAN  
MEMPERHATIKAN STABILITAS TEGANGAN AKIBAT  
PENAMBAHAN PEMBANGKIT DAN BEBAN DI  
KALIMANTAN SELATAN-TENGAH TAHUN 2021  
BERDASARKAN RUPTL**

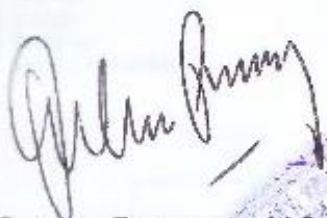
**TUGAS AKHIR**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

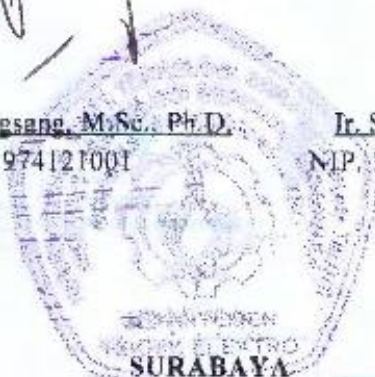


Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

Ir. Samsul Anam MT.

NIP. 194907151974121001

NIP. 196307251990031002



JANUARI, 2018

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **PENEMPATAN OPTIMAL KAPASITOR DENGAN MEMPERHATIKAN STABILITAS TEGANGAN AKIBAT PENAMBAHAN PEMBANGKIT DAN BEBAN DI KALIMANTAN SELATAN-TENGAH TAHUN 2021 BERDASARKAN RUPTL**

**Nama** : Rizqi Aditya Pradana  
**Pembimbing I** : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
**Pembimbing II** : Ir. Sjamsjul Anam MT.

## **ABSTRAK**

Dengan terus meningkatnya jumlah beban seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk, sistem tenaga dipaksa untuk bekerja pada ambang batas kestabilannya. Seiring dengan pertambahan beban, pemenuhan konsumsi daya dilakukan oleh pihak PLN dengan cara membangun pembangkit baru. Hal-hal tersebut dapat menyebabkan kontingensi tegangan pada jaringan yang dapat menyebabkan pemadaman listrik.

Peralatan *Flexible AC Transmission System* (FACTS) yang membantu mengatasi permasalahan kontingensi tegangan. Salah satu peralatan FACTS adalah *Thyrisitor Controlled Series Compensator* (TCSC). Karena performa TCSC bergantung pada lokasi pemasangan dan penentuan besar kapasitas TCSC diperlukan pemasangan dan penentuan ukuran TCSC yang optimal. Metode yang diajukan adalah dengan menggunakan *Fast Voltage Stability Index* (FVSI) sebagai acuan lokasi pemasangan TCSC. FVSI adalah salah satu metode untuk menentukan indikator index stabilitas tegangan. Untuk ukuran TCSC ditentukan dengan menggunakan metode *trial and error*.

Metode tersebut akan diujikan pada jaringan transmisi 150 kV di Kalimantan Selatan-Tengah Tahun 2019 yang mengacu pada RUPTL 2016. Sehingga diharapkan dapat membuktikan peningkatan kestabilan tegangan dengan penambahan TCSC pada jaringan.

Kata kunci: Penempatan Kapasitor Optimal, Kapasitor, FACTS, TCSC, FVSI, fast voltage stability index.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# ***OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENT CONSIDERING VOLTAGE STABILITY IN RESULT OF INCREASING GENERATOR AND LOAD ON SOUTH-CENTRAL BORNEO 2021 BASED ON RUPTL***

***Name*** : Rizqi Aditya Pradana  
***Supervisor*** : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
***Co-Supervisor*** : Ir. Sjamsjul Anam MT.

## **ABSTRACT**

The increasing electrical load demand by the product of population growth, electrical power system is forced to work on its stability limit. In accordance of load increase, fulfillment of power consumption is done by PLN by building new power plant. The mentioned problem is the cause of voltage contingency in networks that can cause blackout.

In result of aforementioned condition, there is a need of using Flexible AC Transmission System (FACTS) devices to solve voltage contingency problem. One kind of FACTS devices is Thyrisitor Controlled Series Compensator (TCSC). In result of TCSC performance is affected by the location of placement and the size of TCSC capacity, there is a need to optimize placement and sizing of TCSC. The method proposed is by using Fast Voltage Stability Index (FVSI) as parameter of TCSC location placement. FVSI is a method to calculate indices of voltage stability. The sizing of TCSC is decided by trial and error method.

The mentioned method will be tested on 150 kV transmission networks of South-Central Borneo in Year 2021 based on RUPTL 2016. We hope it can prove that the increase of voltage stability can be conducted by adding TCSC into networks.

**Keywords:** Optimal Capacitor Placement, Capacitor, FACTS, TCSC, FVSI, fast voltage stability index.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, dengan mengucapkan syukur ke hadirat Allah SWT. atas rahmatnya , hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini adalah sebagai syarat untuk menyelesaikan studi dan memperoleh gelar S1 di Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Dengan terselesainya Tugas Akhir ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ayahanda Khuslan dan Ibunda Sulis Sumiharsih sebagai orang tua penulis yang telah memberikan dukungan baik materi maupun moral kepada penulis
2. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. dan Ir. Sjamsjul Anam MT. selaku dosen pembimbing yang turut membantu penyelesaian Tugas Akhir ini.
3. Dosen S1 Teknik Elektro ITS yang telah memberikan ilmunya sebagai dasar pengetahuan untuk inspirasi dan pendukung Tugas Akhir ini.
4. Staff Administrasi Jurusan yang telah membantu memudahkan administrasi Tugas Akhir ini.
5. Serta pihak-pihak yang mendukung dalam penyelesaian Tugas Akhir ini baik langsung maupun tidak langsung.

Dengan terselesainya Tugas Akhir ini harapan kami sebagai penulis semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi kami khususnya dan pembaca pada umumnya. Karena kesempurnaan hanyalah milik Allah dan manusia adalah tempatnya salah maka penulis meminta maaf apabila ada kekurangan-kekurangan dan penulis juga bersedia menerima masukan-masukan yang dapat membangun Tugas Akhir ini.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR .....	vii
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
ABSTRAK .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
KATA PENGANTAR .....	xv
DAFTAR ISI .....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL.....	xx
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan dan Manfaat.....	2
1.5 Metodologi .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
BAB II LANDASAN TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.2 Pembangkit.....	5
2.3 Transmisi.....	6
2.3.1 Saluran Transmisi Pendek .....	7
2.3.2 Saluran Transmisi Medium.....	7
2.3.3 Saluran Transmisi Panjang .....	8
2.4 Beban .....	9
2.5 Daya Pada Sistem Tenaga Listrik .....	10
2.6 Metode Analisis Aliran Daya.....	11
2.7 Analisis Kestabilan Tegangan.....	13
2.8 <i>Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)</i> .....	14
2.9 Kurva P-V .....	16
2.10 Fast Voltage Stability Index (FVSI).....	17
2.11 Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah .....	18
BAB III PEMODELAN SISTEM TENAGA LISTRIK.....	23
3.1 Data Kelistrikan Sistem Kalimantan Selatan-Tengah Tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016.....	23
3.2 Pemodelan <i>Software</i> .....	30
3.3 Metode Simulasi.....	30

BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISIS.....	33
4.1    Data Simulasi.....	33
4.2    Simulasi Sistem Sebelum Pemasangan TCSC .....	33
4.2.1    Simulasi Aliran Daya sistem Kalimantan Selatan- Tengah tahun 2021.....	33
4.3    Penambahan TCSC dengan Menggunakan Metode <i>Trial and             Error</i> .....	49
4.4 Simulasi Sistem Setelah Pemasangan TCSC .....	51
BAB V PENUTUP.....	65
5.1    Kesimpulan.....	65
5.2    Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA.....	67
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	69

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Pemodelan sistem tenaga listrik sederhana.....	5
<b>Gambar 2. 2</b> Rangkaian ekivalen saluran tranmisi pendek.....	7
<b>Gambar 2. 3</b> Rangkaian ekivalen saluran transmisi menengah model pi .....	8
<b>Gambar 2. 4</b> Rangkaian ekivalen saluran transmisi panjang .....	9
<b>Gambar 2. 5</b> Segitiga Daya .....	10
<b>Gambar 2. 6</b> Model TCSC [8].....	14
<b>Gambar 2. 7</b> Mode Blocked .....	15
<b>Gambar 2. 8</b> Mode Bypassed .....	15
<b>Gambar 2. 9</b> Mode Capacitive-Vernier .....	16
<b>Gambar 2. 10</b> Mode Inductive-Vernier .....	16
<b>Gambar 2. 11</b> Contoh gambar kurva P-V .....	17
<b>Gambar 2. 12</b> Pemodelan Sistem Tenaga Sederhana .....	17
<b>Gambar 2. 13</b> Peta Kelistrikan Provinsi Kalimantan Selatan .....	19
<b>Gambar 2. 14</b> Peta Kelistrikan Provinsi Kalimantan Tengah .....	21
<b>Gambar 3. 1</b> Sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 .....	23
<b>Gambar 3. 2</b> Metodologi simulasi .....	31
<b>Gambar 4. 1</b> Perbandingan nilai FVSI terbesar dari saluran .....	47
<b>Gambar 4. 2</b> Grafik profil tegangan P-V bus 55, 59, 60, dan 61 .....	48
<b>Gambar 4. 3</b> Grafik kurva PV Bus 60 simulasi dibandingkan dengan Power World .....	49
<b>Gambar 4. 4</b> Grafik hasil pemasangan TCSC .....	49
<b>Gambar 4. 5</b> (a) Grafik P-V pada bus 60 setelah pemasangan TCSC (b) grafik P-V pada bus 61 .....	50
<b>Gambar 4. 6</b> Perbandingan FVSI sebelum dan sesudah pemasangan TCSC pada saluran nomor 33 .....	64

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b>	Proyeksi pertumbuhan ekonomi dan kelistrikan Kalimantan Selatan .....	20
<b>Tabel 2. 2</b>	Proyeksi pertumbuhan ekonomi dan kelistrikan Kalimantan Selatan .....	22
<b>Tabel 3. 1</b>	Data Generator pada Sistem Kalimantan Selatan-Tengah 2021-24	
<b>Tabel 3. 2</b>	Data Pembebanan sistem Kalimantan Selatan-Tengah 2021 .....	25
<b>Tabel 3. 3</b>	Data Saluran Sistem Kalimantan Selatan-Tengah 2021 .....	27
<b>Tabel 4. 1</b>	Hasil Simulasi Sistem pada Bus Generator .....	34
<b>Tabel 4. 2</b>	Hasil Simulasi Sistem pada Bus Beban .....	35
<b>Tabel 4. 3</b>	Hasil Aliran Daya Sistem .....	37
<b>Tabel 4. 4</b>	Tabel perhitungan FVSI saluran .....	44
<b>Tabel 4. 5</b>	Hasil Simulasi Sistem pada Bus Generator .....	51
<b>Tabel 4. 6</b>	Hasil Simulasi Sistem pada Bus Beban .....	52
<b>Tabel 4. 7</b>	Hasil Aliran Daya Sistem .....	54
<b>Tabel 4. 8</b>	Tabel perhitungan FVSI saluran .....	61

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Seiring dengan pertumbuhan penduduk, konsumsi tenaga listrik di Indonesia akan terus meningkat. Peningkatan konsumsi tenaga listrik berpengaruh pada sistem kelistrikan di Indonesia. Yaitu salah satunya adalah peningkatan beban yang harus ditanggung oleh sistem. Peningkatan beban dapat menyebabkan sistem dipaksa untuk menyeimbangkan antara beban dan daya yang disuplai oleh pembangkit. Untuk itulah dilakukan penambahan pembangkit guna menambah jumlah daya total yang dapat dihasilkan oleh pembangkit. Dengan adanya perubahan beban dan konfigurasi pada sistem transmisi tenaga listrik akibat penambahan pembangkit dapat menimbulkan kontingensi tegangan yang dapat mengakibatkan fenomena *voltage collapse* yang menyebabkan pemadaman listrik[1].

Untuk meningkatkan stabilitas tegangan dan meningkatkan kualitas pengiriman tenaga listrik diperlukan adanya kompensator daya reaktif yang juga dapat mengurangi losses akibat transmisi yaitu berupa peralatan *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS)[2]. Penambahan peralatan FACTS dapat membantu meningkatkan profil tegangan dan menambah kapasitas pengiriman daya dari suatu transmisi. Sehingga penambahan peralatan FACTS adalah salah satu solusi atas permasalahan kontingensi tegangan yang terjadi pada sistem kelistrikan. Salah satu jenis FACTS yang digunakan pada lapangan adalah jenis *Thyristor Controlled Series Compensator* (TCSC). TCSC merupakan salah satu peralatan FACTS yang berupa kompensator seri yang berfungsi untuk mengurangi reaktansi total dari suatu saluran transmisi.

Pada tugas akhir ini, metode *Fast Voltage Stability Index* (FVSI), yang diajukan oleh Musirin *et al* pada tahun 2002, digunakan sebagai parameter untuk menentukan tempat pemasangan TCSC. Nilai dari TCSC ditentukan dengan metode *trial and error*. Untuk melihat perbaikan stabilitas tegangan, dibandingkan data dari sistem tenaga listrik sebelum pemasangan TCSC dan sesudah pemasangan TCSC dengan membentuk kurva P-V yang berfungsi untuk melihat profil tegangan pada suatu bus. Sistem yang digunakan adalah pada sistem transmisi 150 KV Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016.

## **1.2 Permasalahan**

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana menyimulasikan dan menganalisis aliran daya dari data sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016?
2. Bagaimana menganalisis stabilitas tegangan dari data yang telah disimulasikan?
3. Bagaimana cara pemodelan penentuan lokasi dan pemasangan peralatan TCSC?
4. Bagaimana kondisi sistem setelah dipasang peralatan TCSC?

## **1.3 Batasan Masalah**

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Pembahasan mencakup sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016.
2. Data perubahan konfigurasi transmisi, pengembangan pembangkit, dan beban di Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016.
3. Analisis kestabilan tegangan pada sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016 dengan menggunakan metode FVSI.
4. Analisis lokasi pemasangan TCSC berdasarkan metode FVSI.
5. Pembentukan kurva P-V diambil dengan batas tegangan 1.1 p.u-0.9 p.u.

## **1.4 Tujuan dan Manfaat**

Tugas akhir ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan tegangan pada sistem transmisi Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016 akibat perubahan konfigurasi, penambahan pembangkit, dan perkembangan kebutuhan listrik. Perbaikan kestabilan tegangan dilakukan dengan pemasangan peralatan FACTS yang berupa TCSC pada line yang memiliki nilai FVSI terbesar.

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi Perusahaan Listrik Negara sebagai analisis aliran daya dan kestabilan tegangan dari sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016.

## 1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur  
Studi literatur dilakukan dengan mempelajari teori pendukung, *paper*, atau jurnal terkait yang memiliki kasus serupa.
2. Pengumpulan Data  
Pengumpulan data yang berupa data sistem transmisi, data pembangkit, data pembebanan tiap bus dan *single line diagram* dari sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016.
3. Pemodelan dan Simulasi  
Memodelkan *single line diagram* sistem tersebut dari data yang telah diperoleh pada software untuk kemudian dilakukan akan analisis.
4. Analisis  
Analisis yang dilakukan adalah analisis aliran daya dan kestabilan tegangan. Analisis aliran daya menggunakan metode Newton-Raphson yang dilakukan menggunakan software. Dari hasil analisis aliran daya tersebut, didapatkan data yang kemudian diolah untuk mendapatkan nilai FVSI dari setiap saluran. Saluran dengan nilai FVSI terbesar merupakan lokasi pemasangan dari TCSC. Besar nilai TCSC yang terpasang berdasarkan nilai FVSI keseluruhan sistem dan FVSI pada bus tersebut. Selanjutnya dilihat perbandingan nilai dari nilai FVSI sebelum dan sesudah pemasangan TCSC. Untuk mengetahui perbaikan kestabilan tegangan, menggunakan kurva P-V dari data sebelum dan sesudah pemasangan TCSC.
5. Penulisan Buku Tugas Akhir  
Penyusunan laporan dilakukan untuk menampung hasil dari penelitian ke dalam bentuk tulisan yang berisikan teori terkait permasalahan yang diangkat, proses yang dilakukan selama penelitian, analisis dari hasil yang didapatkan, dan kesimpulan yang didapat. Selain itu terdapat saran atas apa yang telah dilakukan dengan harapan dapat berguna untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika yang ditetapkan pada penyusunan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

### **BAB I : PENDAHULUAN**

Bab ini berisikan tentang latar belakang dari pengerjaan tugas akhir, tujuan, permasalahan, batasan masalah, metodologi, dan sistematika penulisan.

### **BAB II : LANDASAN TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini menjelaskan mengenai teori penunjang yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir.

### **BAB III : PEMODELAN SISTEM**

Dalam bab ini dijelaskan metode pelaksanaan studi serta penerapannya dalam studi kasus pada sistem, bagaimana konfigurasinya, dan beberapa hal mengenai operasi sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016.

### **BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS**

Berisi tentang hasil simulasi aliran daya yang kemudian digunakan sebagai basis untuk analisis kestabilan tegangan sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016. Data yang didapatkan dari analisis tersebut digunakan sebagai acuan untuk pemasangan TCSC dan pengaruh pemasangan TCSC tersebut akan dianalisis kestabilantegangannya dengan menggunakan kurva P-V.

### **BAB V : PENUTUP**

Bab ini merupakan bagian akhir dari laporan yang berisikan kesimpulan dan saran dari hasil penelitian dan analisi pada tugas akhir ini.

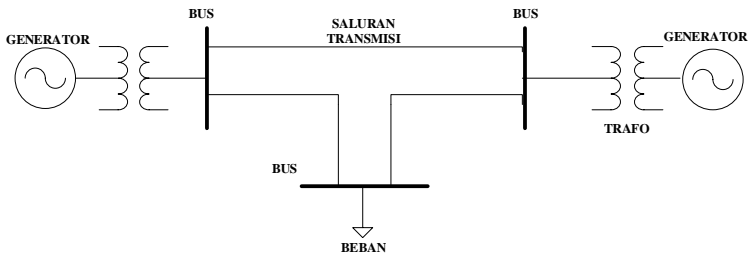


## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Sistem Tenaga Listrik**

Sistem tenaga listrik adalah sebuah jaringan yang menggunakan tenaga listrik mulai dari penghasilan, pengiriman, hingga pemanfaatannya. Sebuah sistem tenaga listrik biasanya terdiri atas beberapa bagian penting yaitu pembangkit, transmisi, dan beban. Komponen-komponen tersebut terhubung dan memberikan imbal-balik yang berpengaruh pada suatu sistem tenaga listrik. Pemodelan sederhana dari sistem tenaga listrik dapat dilihat pada gambar 2.1.



**Gambar 2. 1** Pemodelan sistem tenaga listrik sederhana

#### **2.2 Pembangkit**

Pembangkit adalah bagian dari suatu sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai penyuplai daya ke jaringan. Pembangkit memanfaatkan energi lain untuk dikonversikan ke energi listrik. Pembangkit yang berskala besar pada umumnya menggunakan generator sebagai komponen utama dalam proses pengkonversian energi tersebut. Adapun beberapa jenis pembangkit yang memanfaatkan generator diantaranya adalah PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas), PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir), dan PLTD (Pusat Listrik Tenaga Diesel).

Generator adalah salah satu komponen terpenting dari sistem tenaga listrik karena generator berfungsi sebagai pengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Jenis generator yang dipakai pada pembangkit adalah generator sinkron. Generator sinkron mempunyai dua

medan putar sinkron, yang pertama medan putar sinkron yang dihasilkan oleh rotor yang diputar dalam kecepatan sinkron dan dieksitasi arus DC, dan yang kedua yaitu pada bagian belitan stator oleh arus pada belitan statornya. Pada belitan stator itulah dimana tegangan AC dihasilkan.

### 2.3 Transmisi

Pada sistem tenaga listrik, jarak yang relatif jauh antara pembangkit dengan beban membutuhkan perantara agar dapat tersalurkan. Jarak tersebut terjadi karena pembangkit didirikan dari tempat yang jauh dari pemukiman. Hal ini dikarenakan, pembangkit dibangun di tempat energi primer didapatkan, misalnya pembangkit dibangun di pinggir laut untuk memanfaatkan air yang kemudian dipanaskan untuk didapatkan uapnya sebagai penggerak turbin. Selain itu, pembangkit juga menghasilkan polusi yang dihasilkan akibat pembakaran dan output proses kimia yang diperlukan oleh pembangkit sehingga perlu diberi jarak aman dari pemukiman agar tidak terkena polusi.

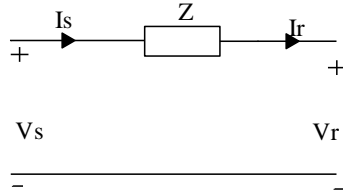
Transmisi daya listrik yang menghubungkan jarak yang jauh akan menimbulkan penurunan kualitas tegangan yang mengalir pada konduktor dan rugi-rugi daya yang disebabkan karena arus yang mengalir pada konduktor. Jarak tersebut mempengaruhi parameter pada transmisi yang menyebabkan perubahan nilai total impedansi dan nilai *line charging* dari suatu transmisi. Nilai total impedansi mempengaruhi besar kerugian daya pada saluran berupa panas yang dihasilkan oleh impedansi kabel berarus.

Transmisi dapat dibagi menjadi dua jenis klasifikasi berdasarkan letak kabelnya yaitu transmisi udara dan transmisi bawah tanah. Transmisi udara biasanya digantung oleh tower penyangga yang biasanya terbuat dari besi, kayu, atau beton dengan metode tertentu. Tower besi dapat berupa saluran *single-circuit* ataupun *double circuit*. Transmisi bawah tanah adalah saluran transmisi yang ditanam di dalam tanah dengan kedalaman dan metode tertentu. Walaupun secara estetika dan lingkungan saluran bawah tanah itu lebih baik, dengan alasan teknis dan ekonomis penggunaan transmisi udara lebih banyak digunakan.

Untuk klasifikasi berdasarkan panjang saluran, transmisi dibagi menjadi tiga jenis yaitu, saluran transmisi pendek, saluran transmisi medium dan saluran transmisi panjang. Masing-masing klasifikasi memiliki pemodelan masing-masing dengan rumus yang berbeda. Namun apabila dihitung secara matematis hasilnya kurang lebih sama.

### 2.3.1 Saluran Transmisi Pendek

Saluran transmisi pendek adalah saluran transmisi dengan panjang kurang dari 80 km (50 miles) dan bertegangan kurang dari 69 kV, berdasarkan literatur nilai kapasitansi saluran dapat diabaikan [3]. Rangkaian ekivalen dari saluran transmisi pendek dapat dilihat pada gambar 2.2.



**Gambar 2. 2** Rangkaian ekivalen saluran tranmisi pendek

Keterangan gambar:

- $V_s$  : tegangan pada sisi kirim
- $I_s$  : arus dari sisi kirim
- $V_r$  : tegangan pada ujung terima
- $I_r$  : arus pada ujung terima
- $Z$  : impedansi saluran

Dari gambar 2.1, dapat dilihat bahwa :

$$V_s = V_r + I_r \cdot Z \text{ dengan } I_s = I_r \quad (2.1)$$

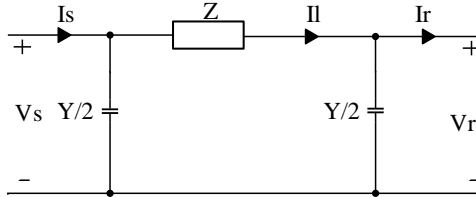
Regulasi tegangan (%VR) dari saluran dapat didefinisikan sebagai presentasi perubahan tegangan pada ujung penerima pada saat kondisi tidak berbeban sampai kondisi beban penuh [3].

$$\% VR = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \quad (2.2)$$

### 2.3.2 Saluran Transmisi Medium

Saluran transmisi menengah adalah saluuran transmisi dengan panjang lebih dari 80 km (50 miles) dan kurang dari 250 km (150 miles) [3]. Pada saluran menengah, nilai kapasitansi dari saluran diperhitungkan dalam pemodelannya. Dalam pemodelannya saluran transmisi medium

admitansi shunt saluran dibagi pada ujung penerima dan ujung pengirim serta pada titik tengah saluran terdapat impedansi saluran[3]. Rangkaian ekivalen dari saluran menengah model pi, dapat dilihat pada gambar 2.3:



**Gambar 2. 3** Rangkaian ekivalen saluran transmisi menengah model pi

Berdasarkan gambar 2.3, nilai  $I_S$ ,  $I_L$  dan  $V_S$  adalah :

$$I_S = I_L + (Y/2) \cdot V_S \quad (2.3)$$

$$I_L = I_R + V_R (Y/2) \quad (2.4)$$

$$V_S = V_R + Z \cdot I_L \quad (2.5)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.3 kedalam persamaan 2.4 didapatkan:

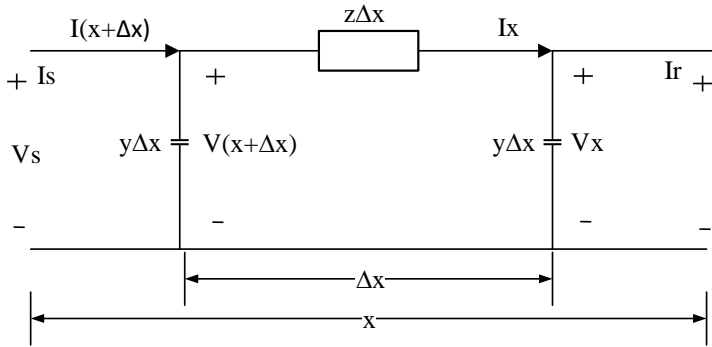
$$V_S = \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2}\right) \cdot V_R + Z I_R \quad (2.6)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.4 dan persamaan 2.6 kedalam persamaan 2.3, maka didapatkan:

$$I_S = V_R \cdot Y \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{4}\right) + I_R \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2}\right) \quad (2.7)$$

### 2.3.3 Saluran Transmisi Panjang

Pada saluran transmisi dengan panjang lebih dari 250 km (150 miles) parameter-parameter terdistribusi secara merata disepanjang saluran [3]. Sehingga untuk mendapatkan rangkaian pengganti dari saluran transmisi panjang dilakukan pendekatan seperti pada gambar 2.4.



**Gambar 2. 4** Rangkaian ekivalen saluran transmisi panjang

Keterangan gambar:

$x$  = panjang saluran

$\Delta x$  = elemen panjang saluran

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.16)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.17)$$

Parameter ABCD untuk saluran panjang diperoleh dari:

$$A = D = 1 + \frac{1}{2}YZ \quad (2.18)$$

$$B = Z \left( 1 + \frac{1}{6}YZ \right) \quad (2.19)$$

$$C = Y \left( 1 + \frac{1}{6}YZ \right) \quad (2.20)$$

## 2.4 Beban

Sistem tenaga menyuplai tenaga listrik ke beban untuk melakukan kerja. Beban dalam sistem tenaga dapat berupa beban industri hingga beban residensial. Beban juga membutuhkan suplai daya yang memiliki kriteria tertentu, misalnya pada peralatan rumah di Indonesia membutuhkan tegangan 220 V dan memiliki frekuensi sekitar 50 Hz.

Beban-beban di industri dapat berupa komposit motor, motor induksi. Sehingga perhitungan daya pada beban industri juga mempertimbangkan daya reaktif. Semakin besar daya reaktif akan

menurunkan faktor daya pada suatu sistem. Meningkatnya faktor daya dapat berpengaruh buruk yaitu berkurangnya daya aktif yang dapat digunakan pada sistem. Hubungan antara daya aktif, daya reaktif, dan power faktor akan dijelaskan pada subbab berikutnya.

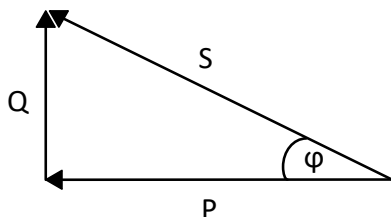
Dalam pemodelannya beban dalam sistem tenaga listrik digunakan tiga model beban, yaitu [4]:

- Beban direpresentasikan sebagai daya konstan. Daya nyata (MW) dan daya reaktif (MVar) dianggap konstan.
- Beban direpresentasikan sebagai arus konstan. Beban menarik arus yang besarnya konstan dari jaringan sistem.
- Beban direpresentasikan sebagai impedansi konstan. Kondisi ini sering dipakai dalam mempresentasikan beban dalam studi stabilitas.

## 2.5 Daya Pada Sistem Tenaga Listrik

Daya merupakan jumlah energi yang digunakan untuk melakukan usaha. Dalam sistem tenaga listrik, daya listrik dapat didefinisikan sebagai perubahan rata-rata dari energi listrik terhadap waktu. Daya listrik dalam perhitungannya diklasifikasikan menjadi tiga yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya nyata (S).

Untuk dapat memahami konsep daya tersebut, dapat dilihat pada gambar 2.5.



**Gambar 2. 5** Segitiga Daya

Besaran masing-masing daya dapat diperoleh dari persamaan dibawah ini:

$$S = V \times I \quad (2.18)$$

$$P = S \times \cos \varphi = V \times I \times \cos \varphi \quad (2.19)$$

$$Q = S \times \sin \varphi = V \times I \times \sin \varphi \quad (2.20)$$

$\phi$  merupakan perbedaan sudut antara arus dengan tegangan dalam fungsi waktu.  $\cos \phi$  disebut juga faktor daya (PF) mewakili kondisi perbandingan besaran-besaran dalam sistem tenaga listrik. Jika sudut arus mendahului tegangan, maka beban dinyatakan bersifat leading ( $\cos \phi$  bernilai negatif), dan jika sudut dari arus tertinggal dari tegangan, maka dinyatakan bersifat lagging ( $\cos \phi$  bernilai positif). Selain itu nilai PF juga mewakili kondisi suatu beban. Sebagai contoh, jika sebuah beban menyerap daya aktif yang sama tetapi memiliki nilai PF berbeda, maka rugi daya terbesar adalah pada beban dengan PF terendah. Hal ini karena besar arus yang diserap beban dengan PF rendah akan lebih tinggi sehingga rugi daya ( $I^2R$ ) juga akan lebih tinggi.

## 2.6 Metode Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya (*load flow*) digunakan untuk menghitung besaran-besaran pada sebuah sistem tenaga listrik. Analisis aliran daya ini digunakan untuk perencanaan, operasi, dan pengendalian operasi [3]. Dengan menggunakan analisis aliran daya, kita dapat mengetahui informasi mengenai besaran-besaran listrik pada suatu sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, analisis aliran daya menjadi dasar untuk melakukan analisis kelistrikan dari suatu sistem tenaga, mulai dari analisis hubung singkat, proteksi, transien hingga kestabilan tegangan dari suatu sistem.

Untuk melakukan analisis kita harus membentuk persamaan matematis untuk mendapatkan nilai dari besaran-besaran yang ada dalam sistem tenaga listrik. Berdasarkan literatur hubungan antara besar tegangan bus dan arus dinyatakan dalam persamaan 2.21[3].

$$I_{BUS} = Y_{BUS} V_{BUS} \quad (2.21)$$

Pernyataan diatas, dapat dinyatakan dalam bentuk matriks admitansi sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \\ \dots \\ Ii \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y11 & Y12 & Y13 & \dots & Y1j \\ Y21 & Y22 & Y23 & \dots & Y2j \\ Y31 & Y32 & Y33 & \dots & Y3j \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Yi1 & Yi2 & Yi3 & \dots & Yij \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \\ \dots \\ Vi \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Dengan:

$i = j$  = jumlah total bus

$V_i$  = tegangan fasor pada titik  $i$

$I_i$  = arus fasor yang mengalir ke titik  $i$

Matriks  $Y_{bus}$  adalah matriks dari admitansi saluran suatu sistem tenaga listrik. Elemen diagonal dari matriks  $Y_{bus}$  adalah jumlah total admitansi dari saluran yang terhubung pada suatu bus. Jika ditulis pada persamaan matematis adalah sebagai berikut :

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n Y_{ij} \text{ dengan nilai } j \neq i \quad (2.23)$$

Sedangkan elemen lain dari matriks  $Y_{bus}$  adalah besar admitansi antar bus atau biasa disebut admitansi transfer atau admitansi saluran :

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2.24)$$

Setelah membentuk matriks  $Y_{bus}$  untuk menganalisis sistem tenaga listrik membutuhkan tambahan metode lain untuk mendapatkan hasil aliran daya. Salah satunya adalah metode *Newton-Raphson* merupakan salah satu metode yang digunakan dalam penyelesaian masalah studi aliran daya pada sistem tenaga listrik yang besar. Adapun pemodelan matematis dari metode *Newton-Raphson* adalah sebagai berikut:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle \delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.25)$$

Bila digunakan persamaan aliran daya dalam bentuk polar, maka menjadi:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.26)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.27)$$



Dengan:

$P_i$  = daya aktif pada bus  $i$

$Q_i$  = daya reaktif pada bus  $i$

$Y_{ij}, \theta_{ij}$  = besar dan sudut phasa elemen matriks  $Y_{bus}$

$V_i, \delta_i$  = besar dan sudut phasa tegangan pada bus  $i$

$V_j, \delta_j$  = besar dan sudut phasa tegangan pada bus  $j$

Setelah menghitung tegangan dan daya maka akan ditentukan matrik Jacobian untuk membantu mengecek konvergensi hasil perhitungan. Matriks Jacobian yang digunakan untuk mencari aliran daya setiap bus, dapat ditulis sebagai persamaan berikut [3]:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \frac{\Delta|V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Dengan menggunakan persamaan 2.7, akan didapatkan nilai dari  $\Delta\theta_i$  dan  $\Delta|V_i|$  sebagai koreksi dari besar dan sudut tegangan iterasi yang baru.

$$\theta_i^{(k+1)} = \theta_i^{(k)} + \Delta\theta_i \quad (2.29)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V_i| \quad (2.30)$$

Dengan:

$k$  = jumlah iterasi Newton-Raphson

$\Delta\theta_i$  = perubahan sudut tegangan pada bus ke- $i$

$\Delta|V_i|$  = perubahan magnitudo tegangan pada bus ke- $i$

Iterasi atau pengulangan perhitungan selesai ketika selisih daya antara perhitungan ke- $n$  dan ke- $n+1$  adalah kurang dari atau sama dengan ketepatan perhitungan yang ditentukan.

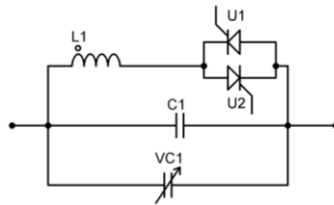
## 2.7 Analisis Kestabilan Tegangan

Analisis kestabilan tegangan adalah analisis perhitungan tingkat kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan pada bus sesuai dengan batas yang diijinkan pada keadaan operasi normal maupun setelah terjadi gangguan [5]. Gangguan dapat berupa penambahan jumlah beban, atau perubahan konfigurasi sistem yang

menyebabkan perubahan aliran daya. Metode yang akan digunakan untuk menganalisis kestabilan tegangan dalam tugas akhir ini adalah metode *Fast Voltage Stability Index (FVSI)* yang akan dibahas pada sub-bab berikutnya.

## 2.8 Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)

TCSC terdiri atas kapasitor bank dan induktor yang dipasang seri dengan *bi-directional thyristor* seperti pada gambar 2.7 Secara prinsip, TCSC berguna untuk mengompensasi saluran transmisi untuk mengatur impedansi saluran, menambah kemampuan membebanan dan mencegah voltage collapse.[4]. Berikut ini adalah model dari TCSC.



**Gambar 2. 6** Model TCSC [8]

Karakteristik TCSC bergantung pada reaktansi relatif dari kapasitor bank dan bagian cabang *thyristor*. Frekuensi resonansi ( $\omega_r$ ) dari LC adalah :

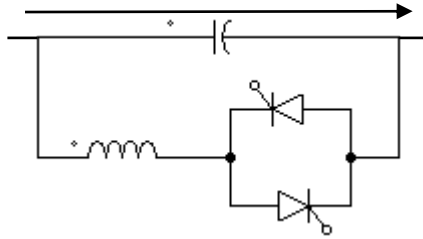
$$X_C = -\frac{1}{\omega_n C} \quad (2.32)$$

$$X_L = \omega L \quad (2.33)$$

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{-\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.34)$$

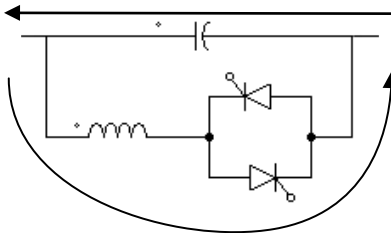
TCSC dapat beroperasi dalam beberapa mode :

1. Mode Blocked, *thyristor* tidak dinyalakan sehingga arus tidak mengalir melalui rangkaian control dari TCSC karena thyristor bekerja seperti saklar yang terbuka seperti pada gambar 2.10. Sehingga rangkaian bekerja seperti sebuah kapasitor yang ukurannya tetap.



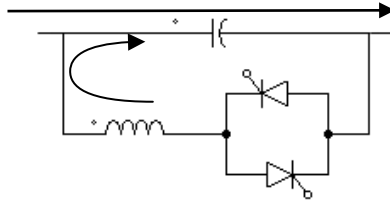
**Gambar 2. 7** Mode Blocked

2. Mode Bypass, *thyristor* dioperasikan sedemikian rupa sehingga arus mengalir seperti pada gambar 2.9 yang menyebabkan rangkaian bekerja seperti sebuah kombinasi antara inductor dan kapasitor yang terpasang paralel. Pada mode ini tegangan DC-offset dari kapasitor juga akan diawasi dan akan di-*discharge* oleh sistem kontrol untuk menghindari kerusakan pada trafo sistem transmisi.



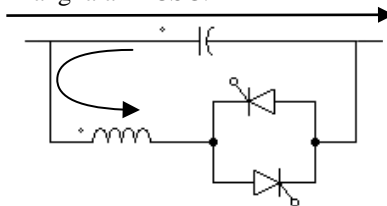
**Gambar 2. 8** Mode Bypassed

3. Mode Capacitive-Vernier, *thyristor* dioperasikan sedemikian rupa sehingga  $X_L < X_C$ . Pada mode ini arus TCR berlawanan dengan arus kapasitor sehingga menyebabkan terjadinya loop arus pada control TCSC seperti pada gambar 2.10. Arus tersebut menambah tegangan pada kapasitor sehingga meningkatkan ekivalen reaktansi kapasitif dari rangkaian.



**Gambar 2. 9** Mode Capacitive-Vernier

4. Mode Inductive-Vernier, *thyristor* dioperasikan sedemikian rupa sehingga  $X_L > X_C$ . Pada mode ini arus pada loop control TCSC berlawanan dengan arus pada kapasitor seperti pada gambar 2.11. Sehingga mengurangi tegangan antar ujung kapasitor yang menyebabkan peningkatan total impedansi ekuivalen rangkaian TCSC.



**Gambar 2. 10** Mode Inductive-Vernier

Untuk menghindari *overcompensation*, daerah kerja dari TCSC berkisar antara  $-0,7 X_{line}$  sampai dengan  $0,2 X_{line}$  [9].

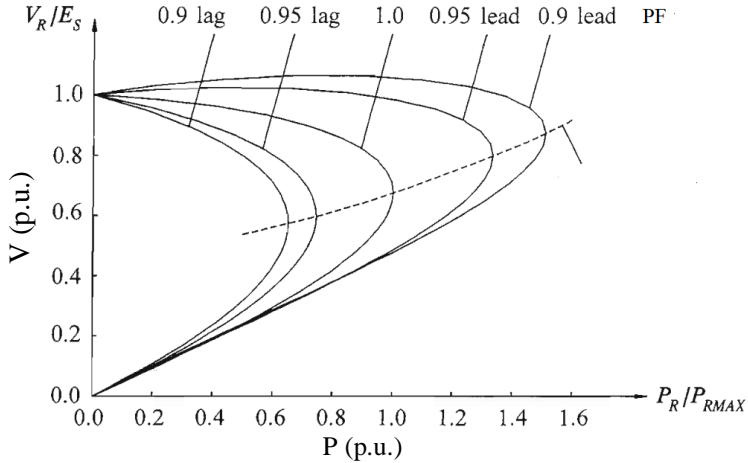
## 2.9 Kurva P-V

Kurva P-V adalah salah satu cara untuk menganalisis profil tegangan dari suatu bus. Dari kurva P-V kita dapat mengetahui range pembebanan dapat dilakukan pada suatu titik hingga terjadinya tegangan kolaps. Metode ini dilakukan dengan cara mengamati hubungan antara pembebanan dan tegangan yang digambarkan secara grafik seperti pada gambar 2.12.

Ada beberapa cara untuk mendapatkan kurva P-V, yaitu :

- a. Pembebanan daya reaktif, dengan metode ini nilai daya reaktif dinaikkan secara bertahap dan nilai tegangannya dicatat pada tiap-tiap titik. Nilai dari daya aktif dijaga tetap konstan.
- b. Pembebanan daya aktif, dengan metode ini yang diubah adalah daya aktif beban dan daya reaktifnya dijaga tetap konstan.

- c. Pembebanan daya nyata, dengan metode ini daya aktif dan daya reaktif dinaikkan secara bertahap namun proporsional terhadap PF awal, sehingga nilai PF selalu konstan.

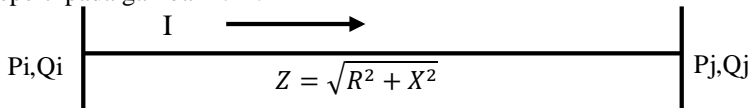


**Gambar 2. 11** Contoh gambar kurva P-V

Pada awalnya analisis tersebut menggunakan teknik *continuation power flow* (CPF). Namun, permasalahan konvergensi terjadi pada titik di dekat titik kritis. Untuk mengatasi masalah ini digunakan teknik *optimal multiplier-based Newton-Raphson method*. Dalam metode tersebut, pembebanan dinaikkan secara bertahap dan dihitung dengan menggunakan metode *Newton-Raphson* hingga di dekat titik kritis, titik yang menyebabkan perhitungan tidak konvergen. Setelah menemukan titik tersebut, untuk menghitung titik sesudahnya diperlukan metode baru yaitu teknik prediktor-korektor.

## 2.10 Fast Voltage Stability Index (FVSI)

Untuk menghitung kestabilan tegangan Musirin et al [6] telah mengajukan sebuah persamaan yaitu FVSI. Adapun pemodelannya seperti pada gambar 2.12.



**Gambar 2. 12** Pemodelan Sistem Tenaga Sederhana

Dan persamaan dari FVSI adalah sebagai berikut :

$$FVSI_{ij} = \frac{4Z^2 Q_j}{V_i^2 X} \quad (2.31)$$

Keterangan :

$FVSI_{ij}$  = Fast Voltage Stability Index saluran ij

$Z$  = impedansi dari saluran

$Q_j$  = daya reaktif yang diterima

$V_i$  = tegangan sisi kirim

$X$  = reaktansi dari saluran

Parameter-parameter FVSI di atas adalah beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kestabilan tegangan. Kestabilan tegangan seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya adalah kemampuan dari bus untuk mempertahankan tegangan sehingga dengan kata lain adalah kemampuan menjaga tegangan untuk tidak berubah secara drastis ketika mengalami gangguan. Parameter-parameter FVSI memiliki pengaruh langsung pada perubahan tegangan terutama pada drop tegangan. Pertama parameter impedansi  $Z$  dan reaktansi  $X$  dimana keduanya akan mempengaruhi besar  $Q_j$  yang menyebabkan drop tegangan pada sepanjang saluran. Sedangkan parameter  $V_i$  juga mempengaruhi drop tegangan di kedua ujung saluran, dimana hubungannya adalah dimana semakin besar  $V_i$  akan mengurangi drop tegangan yang terjadi.

## 2.11 Sistem Kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah

Sistem kelistrikan Provinsi Kalimantan Selatan sampai dengan September 2015, daya terpasang total adalah 588 MW dengan daya mampu sekitar 498 MW dan beban puncak 389 MW. Sistem Transmisi Kalimantan Selatan-Tengah merupakan sistem interkoneksi kelistrikan terbesar di Kalimantan Selatan. Sistem ini merupakan sistem interkoneksi dengan jaringan transmisi 150 kV dan 70 kV, dipasang dari beberapa jenis pembangkit meliputi PLTA, PLTU, PLTD minyak dan PLTG minyak yang tersebar dari Batu Licin di Kalimantan Selatan hingga ke Sampit di Kalimantan Tengah seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13. Berdasarkan sumber dari PLN, sistem ini adalah pemasok utama kebutuhan tenaga listrik di Provinsi Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah dengan total daya terpasang 639 MW, daya mampu sekitar 540 MW dan beban puncak 494 MW.



Berdasarkan realisasi penjualan lima tahun terakhir termasuk adanya daftar tunggu yang cukup besar dan dengan mempertimbangkan kecenderungan pertumbuhan ekonomi regional, penambahan penduduk dan peningkatan rasio elektrifikasi untuk mengimbangi kebutuhan listrik dimasa yang akan datang, proyeksi kebutuhan listrik 2016–2021 diberikan pada Tabel

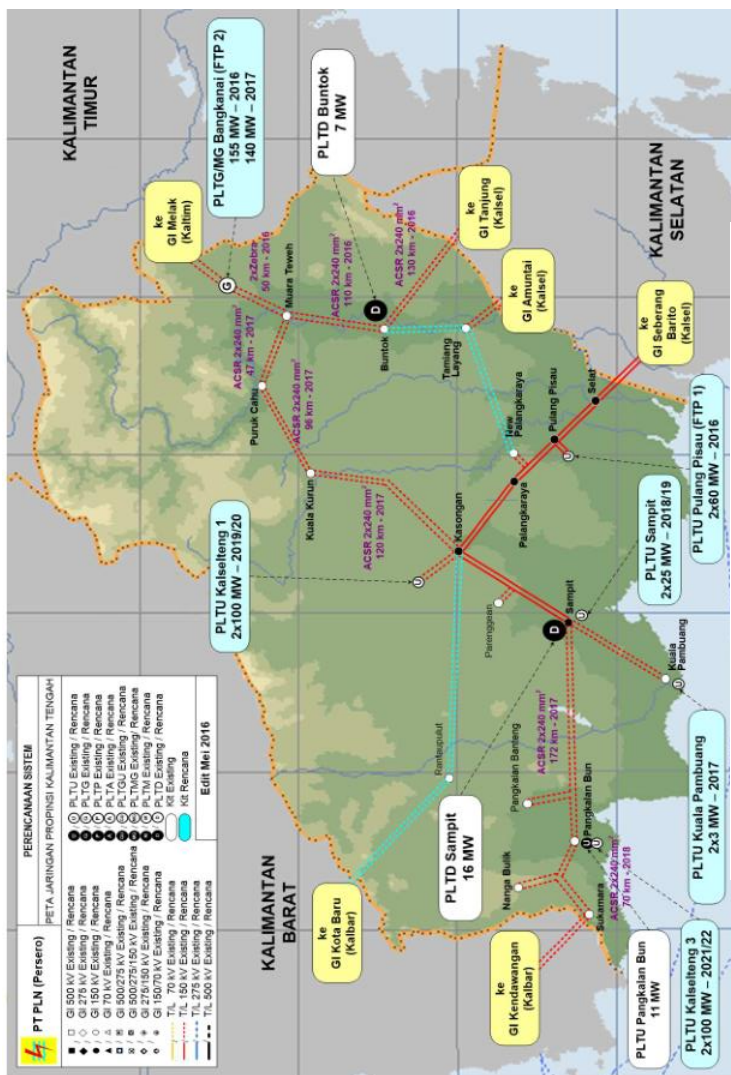
**Tabel 2. 1** Proyeksi pertumbuhan ekonomi dan kelistrikan Kalimantan Selatan

Tahun	Pertumbuhan Ekonomi (%)	Penjualan Listrik (GWh)	Produksi Listrik (GWh)	Beban Puncak MW	Pelanggan
2016	5.7	2,486	3,035	493	1,051,053
2017	6.1	2,911	3,600	567	1,097,365
2018	6.3	3,219	4,023	622	1,145,454
2019	6.4	3,553	4,404	678	1,195,497
2020	6.2	3,897	4,793	736	1,246,227
2021	6.2	4,240	5,178	793	1,298,418

Untuk kelistrikan Kalimantan Tengah dipasok oleh sistem interkoneksi 150 kV Sistem interkoneksi Kalimantan Selatan-Tengah melalui beberapa GI di Kalimantan Tengah. Kapasitas terpasang di seluruh pembangkit di daerah Kalimantan Tengah adalah 186 MW dengan daya mampu sekitar 155 MW dan beban puncak 198 MW. Sebagian beban yaitu sebesar 123 MW dipasok dari sistem interkoneksi Kalimantan Selatan-Tengah seperti pada gambar 2.14.

Kalimantan Tengah memiliki potensi batubara yang besar terutama di kabupaten Barito Utara sehingga akan mendukung produksi listrik di daerah ini. Survey yang dilakukan sejak tahun 1975 oleh beberapa institusi, baik pemerintah maupun perusahaan asing seperti PT BHP – Biliton menunjukkan bahwa di Kalimantan Tengah terdapat sekitar 400 juta ton batubara dengan nilai kalori di atas 7.000 kkal per kg dan juga ditemukan batubara dengan kandungan kalori di atas 8.000 kkal per kg di kabupaten Barito Utara dan Murung Raya bagian utara. Batubara banyak ditemukan di daerah Muara Bakah, Bakanon, Sungai Montalat, Sungai Lahei, Sungai Maruwai dan sekitarnya.





Pertumbuhan ekonomi Provinsi Kalimantan Tengah dalam lima tahun terakhir adalah rata-rata sebesar 6,8% per tahun. Sektor pertanian, perkebunan sawit, pertambangan batu bara dan perdagangan akan memberikan prospek cerah untuk perkembangan ke depan. Mengacu dari data PLN rasio elektrifikasi Kalimantan Tengah masih cukup rendah sehingga diperkirakan kebutuhan listrik hingga lima tahun mendatang diperkirakan akan masih tinggi. Adapun proyeksi perkembangan Kalimantan Tengah berdasarkan data PLN adalah seperti pada tabel 2.2.

**Tabel 2. 2** Proyeksi pertumbuhan ekonomi dan kelistrikan Kalimantan Selatan

Tahun	Pertumbuhan Ekonomi (%)	Penjualan Listrik (GWh)	Produksi Listrik (GWh)	Beban Puncak MW	Pelanggan
2016	5.7	2,486	3,035	493	1,051,053
2017	6.1	2,911	3,600	567	1,097,365
2018	6.3	3,219	4,023	622	1,145,454
2019	6.4	3,553	4,404	678	1,195,497
2020	6.2	3,897	4,793	736	1,246,227
2021	6.2	4,240	5,178	793	1,298,418

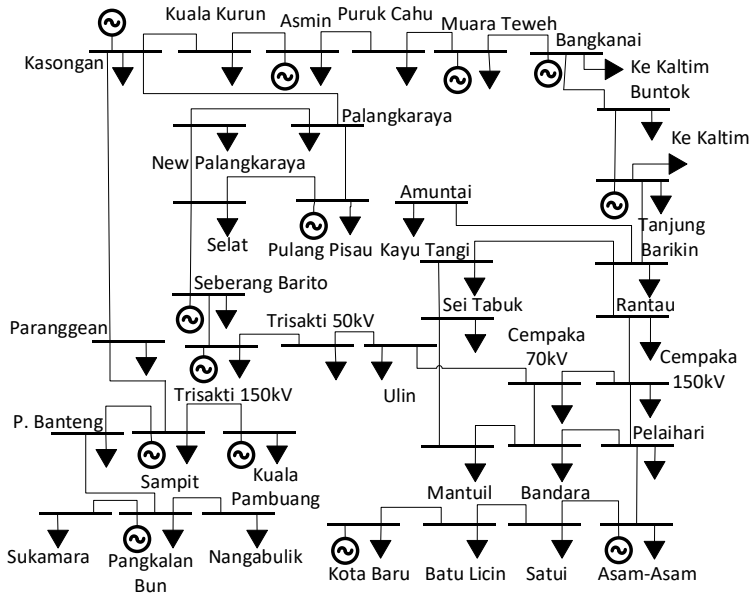
### BAB III

## PEMODELAN SISTEM TENAGA LISTRIK

Pada Bab 3 ini akan dijelaskan tentang pemodelan *single line diagram* dari sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016. Selain itu, juga akan dibahas besar data pembangkitan, saluran, dan beban dari sistem tersebut. Adapun setelah mendapatkan data tersebut, langkah selanjutnya adalah memodelkannya dalam simulasi yang kemudian akan dilanjutkan dengan melakukan metode simulasi yang mengacu pada pustaka yang telah dipelajari.

### 3.1 Data Kelistrikan Sistem Kalimantan Selatan-Tengah Tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016

Sistem kelistrikan yang digunakan adalah sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016. Single line diagram dari sistem tersebut ditunjukkan oleh gambar dibawah ini.



**Gambar 3. 1** Sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021

Data pada tabel di sub-bab ini adalah data dari nilai generator, beban, dan jaringan dari sistem Kalimantan Selatan-Tengah pada tahun 2021 yang akan digunakan sebagai parameter acuan dari simulasi yang akan dilakukan. Data-data berikut ini didapat dari pustaka-pustaka yang berkaitan, diantaranya adalah RUPTL 2016 dan tugas akhir yang telah dibuat sebelumnya. Berikut adalah tabel dari data yang telah dikumpulkan

**Tabel 3. 1** Data Generator pada Sistem Kalimantan Selatan-Tengah 2021

No Bus	Generator	Kapasitas (MW)		Daya Operasi (MW)
		Max	Min	
1	PLTG/MG Bangkanai	120	50	70
2	PLTU Asam-Asam 1	60	26	50
3	PLTU Asam-Asam 2	60	26	50
4	PLTU Asam-Asam 3	60	26	50
5	PLTU Asam-Asam 4	60	26	50
6	PLTU Asmin 1.1	13	6	8
7	PLTU Asmin 1.2	13	6	8
8	PLTU Asmin 2.1	58	26	30
9	PLTU Asmin 2.2	58	26	30
10	PLTD Buntok	6	3	4
11	PLTD Trisakti	80	26	70
12	PLTG/GU Kalsel 1	200	80	100
13	PLTG/GU Kalsel 2	100	40	45
14	PLTU Kalsel 1	85	40	40
15	PLTU Kalsel 2	85	40	40
16	PLTU kalselteng 1.1	89	40	60
17	PLTU kalselteng 1.2	89	40	60
18	PLTU Kalselteng 2.1	89	40	75
19	PLTU Kalselteng 2.2	89	40	65

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

Lanjutan Tabel 3.1

No Bus	Generator	Kapasitas (MW)		Daya Operasi (MW)
		Max	Min	
20	PLTU Kalselteng 3.1	45	20	25
21	PLTU Kalselteng 3.2	45	20	25
22	PLTD Sampit	60	25	30
23	PLTU Kota Baru 1	6	3	4
24	PLTU Kota Baru 2	6	3	4
25	PLTU Kuala Pambuang 1	3	1	2
26	PLTU Kuala Pambuang 2	3	1	2
27	PLTU Pangkalanbun	10	4	7
28	PLTU Pulang Pisau 1	55	25	45
29	PLTU Pulang Pisau 2	55	25	45
30	PLTD Sampit	60	25	30
31	PLTG Trisakti	20	8	15
32	PLTU Sampit 1	22	10	20
33	PLTU Sampit 2	22	10	20

**Tabel 3. 2** Data Pembebanan sistem Kalimantan Selatan-Tengah 2021

No Bus	Nama Bus	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)
34	Asmin 1	0.000	0.000
35	Asmin 2	0.000	0.000
36	Bandara 2	35.501	17.194
37	Barikin	44.400	21.504
38	Buntok	20.200	9.783
39	Cempaka-70	11.600	5.618
40	Cempaka-150	77.000	-58.480
41	Kalsel	0.000	0.000
42	Kalselteng	0.000	0.000

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 3.2**

<b>No Bus</b>	<b>Nama Bus</b>	<b>Daya Aktif (MW)</b>	<b>Daya Reaktif (MVAR)</b>
43	Kasongan	18.000	8.718
44	Kayutangi	30.600	14.820
45	Kuala Kurun	10.400	5.037
46	Mantuil	61.800	29.931
47	Muara Teweh	13.900	6.732
48	New Palangkaraya	31.300	19.398
49	Palangkaraya	42.600	20.632
50	Pelaihari 2	39.500	19.131
51	Pulang Pisau	9.400	4.552
52	Pulang Pisau 1	0.000	0.000
53	Puruk Cahu	5.400	2.615
54	Rantau-150	32.400	15.692
55	Saberang Barito	24.800	12.011
56	Sei Tabuk	23.100	11.188
57	Selat	27.900	13.513
58	Slack	63.800	30.800
59	Tanjung	47.400	22.957
60	Trisakti-70	46.900	-105.77
61	Trisakti-150	64.700	31.336
62	Ulin 70	80.100	38.794
63	Batulicin 1	37.500	18.162
64	Kota Baru 1	27.000	13.050
65	Amuntai	26.200	12.689
66	Kuala Pambuang 1	25.500	15.803
67	Asam Asam 2	11.700	5.667
68	Nangabulik 1	4.700	3.525
69	P. Banteng 1	7.800	5.850

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 3.2**

<b>No Bus</b>	<b>Nama Bus</b>	<b>Daya Aktif (MW)</b>	<b>Daya Reaktif (MVAR)</b>
70	Pangkalan Bun 1	49.400	37.050
71	Kasongan	7.800	5.850
72	Sampit 1	52.400	39.300
73	Satui	17.400	8.427
74	Sukamara 1	4.300	3.225

**Tabel 3. 3** Data Saluran Sistem Kalimantan Selatan-Tengah 2021

<b>No Saluran</b>	<b>Dari Bus</b>	<b>Ke Bus</b>	<b>R (pu)</b>	<b>X (pu)</b>	<b>B (pu)</b>
1	67	2	0.001	0.13333	0
2	67	3	0.001	0.13333	0
3	67	4	0.001	0.13333	0
4	67	5	0.001	0.13333	0
5	6	34	0.006865	0.343265	0
6	7	34	0.006865	0.343265	0
7	35	8	0.001111	0.133273	0
8	35	9	0.001111	0.133273	0
9	38	10	0.013997	0.69986	0
10	39	40	0.001329	0.132938	0
11	72	30	0.002666	0.133307	0
12	55	12	0.001334	0.079989	0
13	16	42	0.00075	0.099972	0
14	17	42	0.00075	0.099972	0
15	67	18	0.000834	0.099997	0
16	67	19	0.000834	0.099997	0
17	70	20	0.0017	0.169992	0

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan tabel 3.3**

<b>No Saluran</b>	<b>Dari Bus</b>	<b>Ke Bus</b>	<b>R (pu)</b>	<b>X (pu)</b>	<b>B (pu)</b>
18	70	21	0.0017	0.169992	0
19	14	41	0.001481	0.088862	0
20	55	13	0.000667	0.079944	0
21	15	41	0.002116	0.088864	0
22	59	22	0.003639	0.399983	0
23	64	24	0.006666	0.666633	0
24	64	23	0.006666	0.666633	0
25	66	25	0.149256	1.492556	0
26	66	26	0.149256	1.492556	0
27	70	27	0.034001	0.63242	0
28	61	31	0.008887	0.399901	0
29	52	28	0.001111	0.133273	0
30	52	29	0.001111	0.133273	0
31	1	58	0.0016	0.079984	0
32	61	11	0.002222	0.133315	0
33	61	60	0.001662	0.099736	0
34	72	32	0.007998	0.39992	0
35	72	33	0.011592	0.316454	0
36	71	43	0.008066	0.025973	0.045483
37	59	41	0.004481	0.014429	0.025268
38	38	59	0.013443	0.043288	0.075805
39	58	47	0.008962	0.028859	0.050536
40	47	38	0.019716	0.06349	0.11118
41	47	53	0.008424	0.027127	0.047504
42	45	43	0.021509	0.069261	0.121287
43	42	43	0.006273	0.020201	0.035375
44	43	49	0.011651	0.037517	0.065697

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya



**Lanjutan tabel 3.3**

<b>No Saluran</b>	<b>Dari Bus</b>	<b>Ke Bus</b>	<b>R (pu)</b>	<b>X (pu)</b>	<b>B (pu)</b>
45	71	72	0.00717	0.023087	0.040429
46	69	70	0.030773	0.072689	0.058708
47	70	68	0.028626	0.067617	0.054613
48	70	74	0.030416	0.071843	0.058026
49	51	52	0.001792	0.005772	0.010107
50	51	57	0.017892	0.042261	0.034133
51	61	55	0.007157	0.016904	0.013653
52	37	59	0.02147	0.050713	0.040959
53	35	34	0.00717	0.023087	0.040429
54	48	49	0.014375	0.036615	0.0063
55	51	49	0.035937	0.091538	0.015749
56	57	48	0.071875	0.183075	0.031498
57	55	57	0.043125	0.109845	0.018899
58	72	69	0.030773	0.072689	0.058708
59	62	60	0.049293	0.116433	0.00446
60	62	39	0.049293	0.116433	0.00446
61	46	61	0.008946	0.02113	0.017066
62	40	36	0.014375	0.036615	0.0063
63	40	54	0.025048	0.059165	0.047786
64	54	37	0.023259	0.054939	0.044373
65	50	40	0.050312	0.128153	0.022049
66	67	50	0.025156	0.064076	0.011024
67	67	46	0.071875	0.183075	0.031498
68	63	73	0.006094	0.019624	0.034365
69	73	67	0.016131	0.051946	0.090965
70	36	46	0.005367	0.012678	0.01024

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan tabel 3.3**

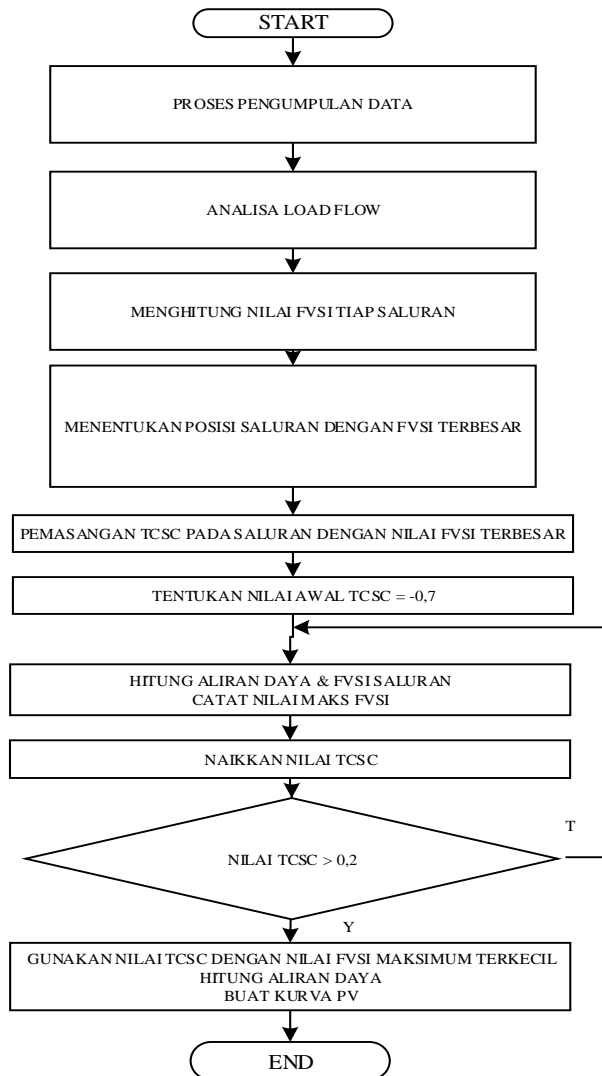
No Saluran	Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
71	37	65	0.017892	0.042261	0.034133
72	44	55	0.014313	0.033809	0.027306
73	56	46	0.005377	0.017315	0.030322
74	44	56	0.005377	0.017315	0.030322
75	37	44	0.021509	0.069261	0.121287
76	45	34	0.010754	0.034631	0.060644
77	53	35	0.001792	0.005772	0.010107
78	64	63	0.006632	0.021356	0.037397
79	66	72	0.057253	0.135235	0.109225

### **3.2 Pemodelan Software**

Dalam sistem ketenagalistrikan, H. Saadat telah membuat software yang digunakan untuk mensimulasikan analisis dan desain sistem tenaga listrik

### **3.3 Metode Simulasi**

Salah satu parameter utama dalam pengujian Tugas Akhir ini adalah *Fast Voltage Stability Index*, yang sudah dijelaskan pada bab 2. Gambar 3.2 adalah metodologi simulasi dari penelitian yang dilakukan untuk mengetahui efek pemasangan TCSC pada stabilitas tegangan dari sistem sistem Kalimantan Selatan-Tengah 2021 berdasarkan RUPTL 2016.(Gambar 3.2 Metode simulasi ada pada halaman berikutnya)



**Gambar 3. 2** Metodologi simulasi

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB IV**

### **HASIL SIMULASI DAN ANALISIS**

Pada Bab 4 ini akan membahas hasil dan analisis dari simulasi sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016. Pada pembahasan ini akan dilakukan analisis aliran daya untuk mendapatkan nilai *Fast Voltage Stability Index* (FVSI) yang akan dijadikan acuan untuk pemasangan *Thyristor Controlled Series Compensator* (TCSC) guna memperbaiki nilai indeks kestabilan tegangan. Kemudian akan dibentuk kurva P-V dari sistem dan dibandingkan dengan kurva P-V awal untuk dibuktikan bahwa pemasangan TCSC menambah kestabilan tegangan sistem terutama pada bus yang telah dipasang. Pembentukan kurva P-V pada sistem tenaga dibentuk dengan cara penambahan beban secara gradual pada bus yang diuji hingga simulasi tidak konvergen atau terjadi *blackout*.

#### **4.1 Data Simulasi**

Data yang digunakan untuk simulasi adalah data sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 berdasarkan RUPTL 2016. Data parameter yang digunakan meliputi data saluran transmisi, data pembangkitan, dan data beban pada aliran daya tahun 2021.

#### **4.2 Simulasi Sistem Sebelum Pemasangan TCSC**

Simulasi dilakukan pada sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021 sebelum ditambahkan TCSC. Hal ini digunakan untuk mendapat data awal yang nantinya akan dibandingkan dengan hasil setelah pemasangan TCSC.

##### **4.2.1 Simulasi Aliran Daya sistem Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021**

Metode yang digunakan untuk analisis aliran daya adalah metode Newton-Raphson. Data yang didapat akan digunakan untuk menghitung nilai FVSI tiap saluran. Pada simulasi ini juga akan dibentuk kurva P-V awal pada bus yang memiliki nilai FVSI terbesar dan akan dipasang TCSC. Berikut ini adalah hasil aliran daya dan perhitungan FVSI setiap saluran pada sistem.

**Tabel 4. 1** Hasil Simulasi Sistem pada Bus Generator

No. Bus	Nama Bus	Tegangan		Daya yang Dihasilkan	
		PU Volt	Angle (Deg)	MW	Mvar
1	Bangkanai	1.03	0	68.576	3.409
2	Asam-Asam 1	1.04	6.857	50	6.215
3	Asam-Asam 2	1.04	6.857	50	6.215
4	Asam-Asam 3	1.04	6.857	50	6.215
5	Asam-Asam 4	1.04	6.857	50	6.215
6	Asmin 1.1	1.045	-0.343	8	0.43
7	Asmin 1.2	1.045	-0.343	8	0.43
8	Asmin 2.1	1.045	0.126	30	1.767
9	Asmin 2.2	1.045	0.126	30	1.767
10	Buntok	1.04	-3.761	4	1.965
11	PLTD Trisakti	1	-2.577	70	14.681
12	PLTG Kalsel 1	1	-2.311	100	14.864
13	PLTG Kalsel 2	1	-4.857	45	12.951
14	Kalsel 1	1.04	-3.49	45	15.479
15	Kalsel 2	1.04	-3.733	40	15.097
16	Kalselteng 1.1	1.03	3.51	60	2.941
17	Kalselteng 1.2	1.03	3.51	60	2.941
18	Kalselteng 2.1	1.04	7.302	75	8.711
19	Kalselteng 2.2	1.04	6.768	65	8.143
20	Kalselteng 3.1	1	0.903	25	4.043
21	Kalselteng 3.2	1	0.903	25	4.043
22	Kaltim	1.032	-2.827	15.6	3.675
23	Kota Baru 1	1.01	2.07	4	0.981
24	Kota Baru 2	1.01	2.07	4	0.981
25	Kuala Pambuang 1	1	-1.197	2	0.627
26	Kuala Pambuang 2	1	-1.197	2	0.627

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.1**

No. Bus	Nama Bus	Tegangan		Daya yang Dihasilkan	
		PU Volt	Angle (Deg)	MW	Mvar
27	Pangkalanbun	1	0.993	7	0.789
28	Pulang Pisau 1	1.012	1.727	45	2.263
29	Pulang Pisau 2	1.012	1.727	45	2.263
30	Sampit Diesel	1.01	0.921	30	2.711
31	Trisakti gas	1	-4.529	15	4.3
32	Uap Sampit 1	1.01	3.178	20	1.294
33	Uap Sampit 2	1.01	2.234	20	1.035
Total				1134.4	366.29

**Tabel 4. 2 Hasil Simulasi Sistem pada Bus Beban**

No. Bus	Nama Bus	Tegangan		Daya yang Diserap	
		PU Volt	Angle (Deg)	MW	Mvar
34	Asmin 1	1	2.41	34.9	20.43
35	Asmin 2	0.99638	1.95	543.1	317.88
36	Bandara 2	0.95634	-3.97	723.2	423.3
37	Barikin	0.97616	-1.32	997.5	583.85
38	Buntok	0.9643	-2.83	506.8	296.64
39	Cempaka-70	0.95938	-3.8	355.2	207.9
40	Cempaka-150	0.95972	-3.4	1138.9	666.1
41	Kalsel	1.027	-5.624	0	0
42	Kalselteng	1.028	0.265	0	0
43	Kasongan	1.021	-1.048	18	8.718
44	Kayutangi	0.981	-8.121	30.6	14.82
45	Kuala Kurun	1.038	-1.727	10.4	5.037
46	Mantuil	0.976	-8.225	61.8	29.931

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan tabel 4.2**

No. Bus	Nama Bus	Tegangan		Daya yang Diserap	
		PU Volt	Angle (Deg)	MW	Mvar
47	Muara Teweh	1.034	-3.164	13.9	6.732
48	New Palangkaraya	0.994	-3.015	31.3	19.398
49	Palangkaraya	1.004	-2.361	42.6	20.632
50	Pelaihari 2	0.996	-1.649	39.5	19.131
51	Pulang Pisau	1.009	-1.926	9.4	4.552
52	Pulang Pisau 1	1.01	-1.634	0	0
53	Puruk Cahu	1.042	-2.198	5.4	2.615
54	Rantau-150	0.976	-9.607	32.4	15.692
55	Saberang Barito	0.99	-6.934	24.8	12.011
56	Sei Tabuk	0.977	-8.284	23.1	11.188
57	Selat	0.997	-3.648	27.9	13.512
58	Slack	1.028	-2.967	63.8	30.8
59	Tanjung	1.019	-6.221	47.4	22.957
60	Trisakti-70	1.035	-13.51	46.9	-105.7
61	Trisakti-150	0.983	-8.004	64.7	31.336
62	Ulin 70	0.959	-15.56	80.1	38.794
63	Batulicin 1	1.006	0.768	37.5	18.162
64	Kota Baru 1	1.004	0.566	27	13.05
65	Amuntai	0.977	-9.193	26.2	12.689
66	Kuala Pambuang 1	0.988	-2.873	25.5	15.803
67	Asam Asam 2	1.034	3.305	11.7	5.667
68	Nangabulik 1	0.994	-1.76	4.7	3.525
69	P. Banteng 1	1.001	-1.651	7.8	5.85
70	Pangkalan Bun 1	0.994	-1.545	49.4	37.05

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya



**Lanjutan tabel 4.2**

No. Bus	Nama Bus	Tegangan		Daya yang Diserap	
		PU Volt	Angle (Deg)	MW	Mvar
71	Kasongan	1.013	-1.256	7.8	5.85
72	Sampit 1	1.006	-1.329	52.4	39.3
73	Satui	1.014	1.328	17.4	8.427
74	Sukamara 1	0.994	-1.768	4.3	3.225
Total				1168.2	160.06

**Tabel 4. 3 Hasil Aliran Daya Sistem**

Dari No.Bus	Ke No.Bus	Aliran Daya			Losses	
		MW	Mvar	MVA	MW	Mvar
1	58	68.577	3.41	68.662	0.071	3.554
2	67	50	6.215	50.385	0.023	3.129
3	67	50	6.215	50.385	0.023	3.129
4	67	50	6.215	50.385	0.023	3.129
6	34	8	0.43	8.012	0.004	0.202
7	34	8	0.43	8.012	0.004	0.202
8	35	30	1.767	30.052	0.009	1.102
9	35	30	1.767	30.052	0.009	1.102
10	38	4	1.965	4.457	0.003	0.129
11	61	70	14.681	71.523	0.114	6.82
12	55	100	14.864	101.099	0.136	8.176
13	55	45	12.951	46.827	0.015	1.753
14	41	45	15.479	47.588	0.031	1.861
15	41	40	15.097	42.754	0.036	1.502
16	42	60	2.941	60.072	0.026	3.401
17	42	60	2.941	60.072	0.026	3.401
18	67	75	8.711	75.504	0.044	5.271
19	67	65	8.143	65.508	0.033	3.967

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.3**

Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya			Losses	
		MW From	Mvar From	MVA From	MW Loss	Mvar Loss
20	70	25	4.043	25.325	0.011	1.09
21	70	25	4.043	25.325	0.011	1.09
22	59	15.6	3.675	16.027	0.009	0.965
23	64	4	0.981	4.119	0.001	0.111
24	64	4	0.981	4.119	0.001	0.111
25	66	2	0.627	2.096	0.007	0.066
26	66	2	0.627	2.096	0.007	0.066
27	70	7	0.789	7.044	0.017	0.314
28	52	45	2.263	45.057	0.022	2.642
29	52	45	2.263	45.057	0.022	2.642
30	72	30	2.712	30.122	0.024	1.186
31	61	15	4.3	15.604	0.022	0.974
32	72	20	1.294	20.042	0.031	1.575
33	72	20	1.035	20.027	0.046	1.244
34	6	-7.996	-0.228	7.999	0.004	0.202
34	7	-7.996	-0.228	7.999	0.004	0.202
34	35	14.594	-7.715	16.508	0.015	-8.753
34	45	1.398	8.172	8.29	0.022	-13.07
35	8	-29.991	-0.665	29.998	0.009	1.102
35	9	-29.991	-0.665	29.998	0.009	1.102
35	34	-14.58	-1.038	14.617	0.015	-8.753
35	53	74.561	2.367	74.599	0.092	-1.901
36	40	29.231	-26.082	39.176	0.228	-0.619
36	46	-64.732	8.888	65.339	0.243	-1.371
37	59	-93.103	-26.821	96.89	2.029	-3.443
37	54	31.545	-0.064	31.545	0.242	-7.972

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.3**

Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya			Losses	
		MW From	Mvar From	MVA From	MW Loss	Mvar Loss
37	65	26.345	6.454	27.124	0.145	-6.235
37	44	-9.187	-1.072	9.249	0.044	-23.314
38	10	-3.997	-1.837	4.399	0.003	0.129
38	59	42.587	-2.871	42.684	0.235	-15.104
38	47	-58.79	-5.075	59.008	0.655	-21.505
39	40	-44.265	-3.001	44.367	0.028	2.769
39	62	32.665	-2.618	32.77	0.559	0.489
40	39	44.293	5.77	44.667	0.028	2.769
40	36	-29.003	25.463	38.595	0.228	-0.619
40	54	1.1	-1.341	1.735	0.003	-9.125
40	50	-93.391	28.591	97.669	5.077	8.632
41	14	-44.969	-13.619	46.986	0.031	1.861
41	15	-39.964	-13.596	42.213	0.036	1.502
41	59	84.933	27.214	89.187	0.344	-4.179
42	16	-59.974	0.46	59.976	0.026	3.401
42	17	-59.974	0.46	59.976	0.026	3.401
42	43	119.949	-0.919	119.953	0.854	-4.677
43	71	21.543	18.206	28.205	0.077	-9.161
43	45	9.212	-41.316	42.331	0.187	-25.111
43	42	-119.095	-3.758	119.154	0.854	-4.677
43	49	70.34	18.15	72.644	0.623	-11.459
44	55	-60.015	-3.893	60.141	0.536	-4.035
44	56	20.184	11.314	23.139	0.034	-5.7
44	37	9.231	-22.241	24.081	0.044	-23.314
45	43	-9.025	16.205	18.549	0.187	-25.111
45	34	-1.376	-21.242	21.287	0.022	-13.07

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.3**

Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya			Losses	
		MW From	Mvar From	MVA From	MW Loss	Mvar Loss
46	61	-27.621	-25.406	37.529	0.125	-2.979
46	67	-102.109	17.324	103.568	8.185	14.487
46	36	64.975	-10.259	65.78	0.243	-1.371
46	56	2.955	-11.591	11.962	0.005	-5.765
47	58	-4.649	20.385	20.908	0.058	-10.56
47	38	59.444	-16.43	61.673	0.655	-21.505
47	53	-68.696	-10.687	69.522	0.374	-9.034
48	49	-35.99	-13.018	38.272	0.211	-0.72
48	57	4.69	-6.38	7.918	0.024	-6.18
49	43	-69.717	-29.609	75.744	0.623	-11.459
49	48	36.201	12.298	38.233	0.211	-0.72
49	51	-9.084	-3.321	9.672	0.031	-3.112
50	40	98.467	-19.958	100.47	5.077	8.632
50	67	-137.968	0.827	137.97	4.827	10.024
42	43	119.949	-0.919	119.953	0.854	-4.677
43	71	21.543	18.206	28.205	0.077	-9.161
43	45	9.212	-41.316	42.331	0.187	-25.111
43	42	-119.095	-3.758	119.154	0.854	-4.677
43	49	70.34	18.15	72.644	0.623	-11.459
44	55	-60.015	-3.893	60.141	0.536	-4.035
44	56	20.184	11.314	23.139	0.034	-5.7
44	37	9.231	-22.241	24.081	0.044	-23.314
45	43	-9.025	16.205	18.549	0.187	-25.111
45	34	-1.376	-21.242	21.287	0.022	-13.07
46	61	-27.621	-25.406	37.529	0.125	-2.979

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.3**

<b>Dari No. Bus</b>	<b>Ke No. Bus</b>	<b>Aliran Daya</b>			<b>Losses</b>	
		<b>MW From</b>	<b>Mvar From</b>	<b>MVA From</b>	<b>MW Loss</b>	<b>Mvar Loss</b>
46	67	-102.109	17.324	103.568	8.185	14.487
46	36	64.975	-10.259	65.78	0.243	-1.371
46	56	2.955	-11.591	11.962	0.005	-5.765
47	58	-4.649	20.385	20.908	0.058	-10.56
47	38	59.444	-16.43	61.673	0.655	-21.505
47	53	-68.696	-10.687	69.522	0.374	-9.034
48	49	-35.99	-13.018	38.272	0.211	-0.72
48	57	4.69	-6.38	7.918	0.024	-6.18
49	43	-69.717	-29.609	75.744	0.623	-11.459
49	48	36.201	12.298	38.233	0.211	-0.72
49	51	-9.084	-3.321	9.672	0.031	-3.112
50	40	98.467	-19.958	100.47	5.077	8.632
50	67	-137.968	0.827	137.97	4.827	10.024
51	52	-89.814	-0.844	89.818	0.142	-1.602
51	57	71.3	-3.918	71.408	0.894	-4.751
51	49	9.114	0.21	9.117	0.031	-3.112
52	28	-44.978	0.379	44.98	0.022	2.642
52	29	-44.978	0.379	44.98	0.022	2.642
52	51	89.956	-0.758	89.959	0.142	-1.602
53	47	69.069	1.653	69.089	0.374	-9.034
53	35	-74.469	-4.268	74.592	0.092	-1.901
54	40	-1.097	-7.784	7.861	0.003	-9.125
54	37	-31.303	-7.908	32.286	0.242	-7.972
55	12	-99.864	-6.688	100.087	0.136	8.176
55	13	-44.985	-11.198	46.358	0.015	1.753
55	61	105.651	-5.726	105.806	0.816	-0.73

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.3**

<b>Dari No. Bus</b>	<b>Ke No. Bus</b>	<b>Aliran Daya</b>			<b>Losses</b>	
		<b>MW From</b>	<b>Mvar From</b>	<b>MVA From</b>	<b>MW Loss</b>	<b>Mvar Loss</b>
55	57	-46.154	11.744	47.624	1.019	-1.135
55	44	60.551	-0.142	60.551	0.536	-4.035
56	46	-2.95	5.826	6.531	0.005	-5.765
56	44	-20.15	-17.014	26.372	0.034	-5.7
57	51	-70.406	-0.834	70.411	0.894	-4.751
57	48	-4.666	0.2	4.67	0.024	-6.18
57	55	47.172	-12.879	48.899	1.019	-1.135
58	1	-68.506	0.145	68.506	0.071	3.554
58	47	4.706	-30.945	31.3	0.058	-10.56
59	22	-15.591	-2.71	15.825	0.009	0.965
59	41	-84.589	-31.393	90.226	0.344	-4.179
59	38	-42.353	-12.233	44.084	0.235	-15.104
59	37	95.132	23.379	97.963	2.029	-3.443
60	61	-97.051	59.663	113.924	0.202	12.091
60	62	50.152	46.109	68.127	2.157	4.208
61	31	-14.978	-3.326	15.343	0.022	0.974
61	11	-69.886	-7.861	70.327	0.114	6.82
61	60	97.253	-47.572	108.264	0.202	12.091
61	55	-104.835	4.997	104.954	0.816	-0.73
61	46	27.746	22.426	35.676	0.125	-2.979
62	60	-47.994	-41.901	63.711	2.157	4.208
62	39	-32.106	3.107	32.256	0.559	0.489
63	73	-56.53	-22.005	60.662	0.213	-6.326
63	64	19.03	3.843	19.414	0.028	-7.466
64	24	-3.999	-0.87	4.092	0.001	0.111
64	23	-3.999	-0.87	4.092	0.001	0.111

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.3**

<b>Dari No. Bus</b>	<b>Ke No. Bus</b>	<b>Aliran Daya</b>			<b>Losses</b>	
		<b>MW From</b>	<b>Mvar From</b>	<b>MVA From</b>	<b>MW Loss</b>	<b>Mvar Loss</b>
64	63	-19.002	-11.31	22.113	0.028	-7.466
65	37	-26.2	-12.689	29.111	0.145	-6.235
66	25	-1.993	-0.562	2.071	0.007	0.066
66	26	-1.993	-0.562	2.071	0.007	0.066
66	72	-21.513	-14.68	26.044	0.281	-21.063
67	2	-49.977	-3.086	50.072	0.023	3.129
67	3	-49.977	-3.086	50.072	0.023	3.129
67	4	-49.977	-3.086	50.072	0.023	3.129
67	5	-49.977	-3.086	50.072	0.023	3.129
67	18	-74.956	-3.441	75.035	0.044	5.271
67	19	-64.967	-4.176	65.101	0.033	3.967
67	50	142.795	9.197	143.091	4.827	10.024
67	46	110.294	-2.837	110.331	8.185	14.487
67	73	75.04	7.935	75.458	0.897	-16.172
68	70	-4.7	-3.525	5.875	0.007	-10.765
69	70	1.482	3.598	3.891	0.028	-11.611
69	72	-9.282	-9.448	13.245	0.03	-11.757
70	20	-24.989	-2.953	25.163	0.011	1.09
70	21	-24.989	-2.953	25.163	0.011	1.09
70	27	-6.983	-0.475	6.999	0.017	0.314
70	69	-1.454	-15.209	15.279	0.028	-11.611
70	68	4.707	-7.24	8.636	0.007	-10.765
70	74	4.308	-8.22	9.28	0.008	-11.445
71	43	-21.466	-27.367	34.782	0.077	-9.161
71	72	13.666	21.517	25.49	0.059	-8.055
72	30	-29.976	-1.526	30.015	0.024	1.186

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.3**

Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya			Losses	
		MW From	Mvar From	MVA From	MW Loss	Mvar Loss
72	32	-19.969	0.281	19.97	0.031	1.575
72	33	-19.954	0.209	19.956	0.046	1.244
72	71	-13.607	-29.572	32.553	0.059	-8.055
72	69	9.312	-2.308	9.594	0.03	-11.757
72	66	21.794	-6.383	22.71	0.281	-21.063
73	63	56.743	15.68	58.869	0.213	-6.326
73	67	-74.143	-24.107	77.963	0.897	-16.172
73	63	56.743	15.68	58.869	0.213	-6.326
74	70	-4.3	-3.225	5.375	0.008	-11.445
Total Loss					33.77	-206.2

Tabel 4.1 & 4.2 merupakan data pembangkitan, dan pembebanan bus pada Kalimantan Selatan-Tengah tahun 2021. Tabel 4.2 merupakan hasil simulasi aliran daya dan rugi-rugi saluran dari sistem.

Setelah didapatkan simulasi aliran daya Nilai FVSI dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.30.

**Tabel 4. 4** Tabel perhitungan FVSI saluran

No Saluran	Dari Bus	Ke Bus	Nilai FVSI
1	67	2	4.084495
2	67	3	4.0849032
3	67	4	4.0849032
4	67	5	4.0849032
5	6	34	0.2704384
6	7	34	0.2704384
7	35	8	1.0347275
8	35	9	1.0347275

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya



**Lanjutan tabel 4.4**

<b>No Saluran</b>	<b>Dari Bus</b>	<b>Ke Bus</b>	<b>Nilai FVSI</b>
9	38	10	2.5439634
10	39	40	3.2015169
11	72	30	0.709101
12	55	12	2.8524634
13	16	42	1.4777543
14	17	42	1.4777543
15	67	18	3.8650534
16	67	19	3.6130329
17	70	20	2.7494017
18	70	21	2.7494017
19	14	41	3.0522056
20	55	13	4.9670536
21	15	41	2.0849914
22	59	22	6.0692016
23	64	24	2.5645952
24	64	23	2.5645952
25	66	25	0.3780764
26	66	26	0.3780764
27	70	27	0.3723135
28	61	31	3.096763
29	52	28	1.413011
30	52	29	1.413011
31	1	58	0.5143767
32	61	11	4.6983886
33	61	60	13.335252
34	72	32	1.0150053
35	72	33	0.3510873

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

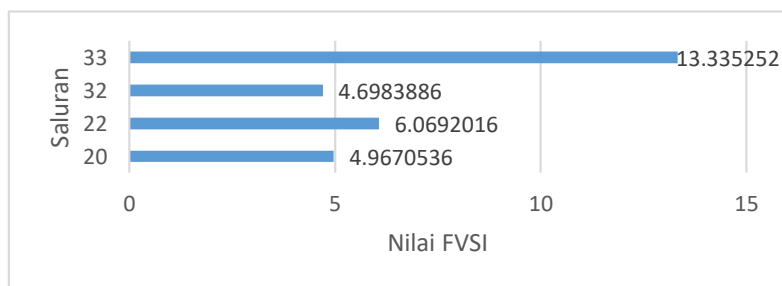
**Lanjutan tabel 4.4**

<b>No Saluran</b>	<b>Dari Bus</b>	<b>Ke Bus</b>	<b>Nilai FVSI</b>
36	71	43	0.0640632
37	59	41	0.0525806
38	38	59	0.0166413
39	58	47	0.0777092
40	47	38	0.1377915
41	47	53	0.0058327
42	45	43	0.147119
43	42	43	0.002481
44	43	49	0.092251
45	71	72	0.0683685
46	69	70	0.029081
47	70	68	0.0268779
48	70	74	0.0261273
49	51	52	0.0006057
50	51	57	0.0181205
51	61	55	0.0110034
52	37	59	0.1272177
53	35	34	0.0231239
54	48	49	0.0525288
55	51	49	0.0022203
56	57	48	0.0043315
57	55	57	0.1673567
58	72	69	0.0184696
59	62	60	0.5583814
60	62	39	0.035947
61	46	61	0.0546393
62	40	36	0.1143865

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan tabel 4.4**

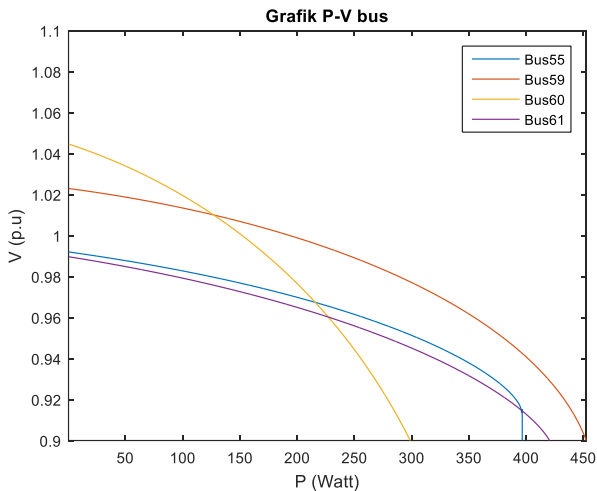
No Saluran	Dari Bus	Ke Bus	Nilai FVSI
63	40	54	0.0092232
64	54	37	0.000403
65	50	40	0.3031771
66	67	50	0.0648146
67	67	46	0.057124
68	63	73	0.0422649
69	73	67	0.0544479
70	36	46	0.015213
71	37	65	0.0312582
72	44	55	0.0005458
73	56	46	0.0149258
74	44	56	0.0287497
75	37	44	0.0107859
76	45	34	0.0367404
77	53	35	0.0017736
78	64	63	0.0114528
79	66	72	0.0950316
Total			95.170171



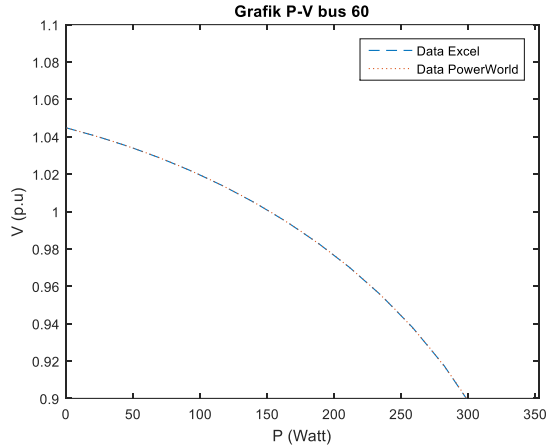
**Gambar 4. 1** Perbandingan nilai FVSI terbesar dari saluran

Untuk memudahkan analisis, yang diperhatikan adalah 4 saluran dengan nilai FVSI terbesar dari tabel 4.4 yaitu : saluran nomor 20, 22, 32 dan 33 seperti pada gambar 4.1. Saluran nomor 33 adalah saluran antara bus 61 dan bus 60, saluran nomor 22 adalah saluran antara bus 59 dan bus 22, saluran nomor 20 adalah saluran antara bus 55 dan bus 13, serta saluran nomor 32 adalah saluran antara bus 61 dan bus 11. Dari bus-bus tersebut yang terhubung dengan beban adalah bus 55, bus 59, bus 60, dan bus 61.

Dari keempat bus tersebut dibentuk kurva P-V dengan metode konstan Q dan nilai P yang berubah. Kurva P-V dari bus-bus yang terhubung dengan beban adalah seperti gambar 4.1. Dari gambar terlihat bahwa kurva P-V dari bus 60 adalah yang paling curam. Hal ini membuktikan bahwa bus dengan FVSI terbesar memiliki kestabilan tegangan rendah. Untuk memvalidasi hasil running, dilakukan perbandingan kurva P-V dengan *software* Power World dan didapatkan gambar 4.2.



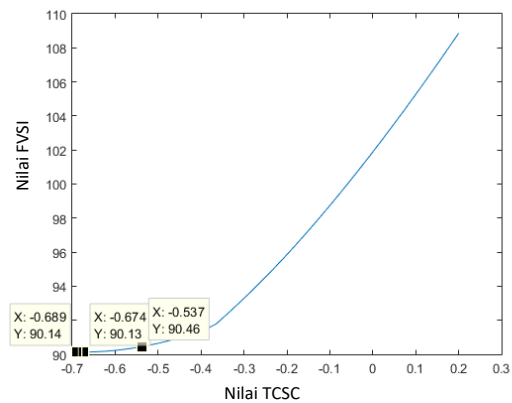
**Gambar 4. 2** Grafik profil tegangan P-V bus 55, 59, 60, dan 61



**Gambar 4. 3** Grafik kurva PV Bus 60 simulasi dibandingkan dengan Power World

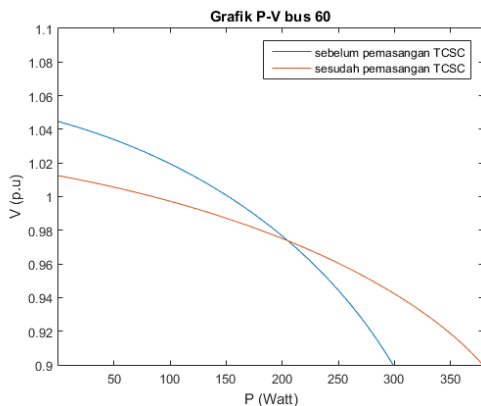
#### 4.3 Penambahan TCSC dengan Menggunakan Metode *Trial and Error*

Nilai TCSC yang dipasang menggunakan metode *trial and error*, nilai TCSC dicoba mulai dari nilai -0.7 hingga 0.2 dan dibentuk grafik nilai TCSC terhadap Nilai FVSI. Dengan menggunakan software didapat grafik seperti gambar 4.3. parameter yang dijadikan acuan adalah rata-rata FVSI ditambah dengan FVSI maksimum bus dibagi dua.

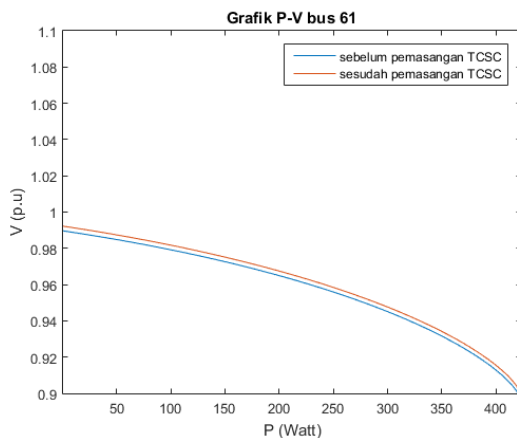


**Gambar 4. 4** Grafik hasil pemasangan TCSC

Nilai optimal TCSC didapat pada nilai  $-0,674$  kemudian dikalikan dengan  $X_{\text{saluran}}$  tempat pemasangan TCSC yaitu saluran nomor 33 yang sebesar  $0.0997362$ . Sehingga besar kompensasi yang diberikan TCSC adalah sebesar  $-0.067222$ . Jadi  $X_{\text{saluran}}$  akhir akan menjadi  $0.032514$  p.u. Pengecekan Kurva P-V setelah pemasangan TCSC digambarkan pada gambar 4.4 dan divalidasi menggunakan Power World pada gambar 4.5.



(a)



(b)

**Gambar 4. 5** (a) Grafik P-V pada bus 60 setelah pemasangan TCSC (b) grafik P-V pada bus 61

Dari grafik 4.4 terlihat bahwa Bus 60 dapat menanggung beban hingga 378 MW setelah penambahan nilai TCSC dari yang sebelumnya hanya sekitar 300 MW. Terjadi selisih sekitar 68 MW dari kondisi semula.

#### 4.4 Simulasi Sistem Setelah Pemasangan TCSC

Nilai TCSC yang telah dihitung pada sub-bab 4.3 digunakan dalam simulasi dengan dipasang seri pada saluran. Sehingga seperti yang telah dihitung sebelumnya nilai Xsaluran akhir pada saluran 33 adalah 0.032514 p.u. Berikut ini adalah hasil simulasi aliran daya setelah pemasangan TCSC.

**Tabel 4. 5** Hasil Simulasi Sistem pada Bus Generator

No. Bus	Nama Bus	Tegangan		Daya yang Dihasilkan	
		PU Volt	Angle (Deg)	MW	Mvar
1	Bangkanai	1.03	0	68.408	3.342
2	Asam-Asam 1	1.04	6.976	50	6.139
3	Asam-Asam 2	1.04	6.976	50	6.139
4	Asam-Asam 3	1.04	6.976	50	6.139
5	Asam-Asam 4	1.04	6.976	50	6.139
6	Asmin 1.1	1.045	-0.347	8	0.41
7	Asmin 1.2	1.045	-0.347	8	0.41
8	Asmin 2.1	1.045	0.128	30	1.721
9	Asmin 2.2	1.045	0.128	30	1.721
10	Buntok	1.04	-3.731	4	1.943
11	PLTD Trisakti	1	-2.755	70	12.754
12	PLTG Kalsel 1	1	-2.431	100	12.843
13	PLTG Kalsel 2	1	-4.973	45	10.932
14	Kalsel 1	1.04	-3.445	45	15.306
15	Kalsel 2	1.04	-3.689	40	14.925
16	Kalselteng 1.1	1.03	3.481	60	2.851

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.5**

No. Bus	Nama Bus	Tegangan		Daya yang Dihasilkan	
		PU Volt	Angle (Deg)	MW	Mvar
17	Kalselteng 1.2	1.03	3.481	60	2.851
18	Kalselteng 2.1	1.04	7.421	75	8.61
19	Kalselteng 2.2	1.04	6.887	65	8.042
20	Kalselteng 3.1	1	0.875	25	4.03
21	Kalselteng 3.2	1	0.875	25	4.03
22	Kaltim	1.032	-2.783	15.6	3.624
23	Kotabaru 1	1.01	2.19	4	0.969
24	Kotabaru 2	1.01	2.19	4	0.969
25	Kuala Pambuang 1	1	-1.224	2	0.623
26	Kuala Pambuang 2	1	-1.224	2	0.623
27	Pangkalan Bun	1	0.966	7	0.785
28	Pulang Pisau 1	1.012	1.668	45	2.003
29	Pulang Pisau 2	1.012	1.668	45	2.003
30	Diesel Sampit	1.01	0.893	30	2.662
31	Gas Trisakti	1	-4.701	15	3.659
32	Uap Sampit 1	1.01	3.149	20	1.277
33	Uap Sampit 1	1.01	2.205	20	1.015
Total				1168.01	151.49

**Tabel 4. 6 Hasil Simulasi Sistem pada Bus Beban**

No. Bus	Nama Bus	Tegangan		Daya yang Diserap	
		PU Volt	Angle (Deg)	MW	Mvar
34	Asmin 1	1.043	-1.788	0	0
35	Asmin 2	1.043	-1.973	0	0
36	Bandara 2	0.974	-8.702	35.501	17.194

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya



**Lanjutan Tabel 4.6**

No. Bus	Nama Bus	Tegangan		Daya yang Diserap	
		PU Volt	Angle (Deg)	MW	Mvar
37	Barikin	0.987	-8.577	44.4	21.504
38	Buntok	1.027	-5.219	20.2	9.783
39	Cempaka-70	0.958	-12.086	11.6	5.618
40	Cempaka-150	0.978	-9.347	77	-58.482
41	Kalsel	1.027	-5.579	0	0
42	Kalselteng	1.028	0.236	0	0
43	Kasongan	1.021	-1.078	18	8.718
44	Kayutangi	0.982	-8.164	30.6	14.82
45	Kuala Kurun	1.038	-1.738	10.4	5.037
46	Mantuil	0.977	-8.253	61.8	29.931
47	Muara Teweh	1.035	-3.155	13.9	6.732
48	New Palangkaraya	0.994	-3.061	31.3	19.398
49	Palangkaraya	1.004	-2.402	42.6	20.632
50	Pelaihari 2	0.996	-1.48	39.5	19.131
51	Pulang Pisau	1.009	-1.985	9.4	4.552
52	Pulang Pisau 1	1.011	-1.693	0	0
53	Puruk Cahu	1.042	-2.195	5.4	2.615
54	Rantau-150	0.976	-9.448	32.4	15.692
55	Saberang Barito	0.992	-7.048	24.8	12.011
56	Sei Tabuk	0.978	-8.319	23.1	11.188
57	Selat	0.997	-3.719	27.9	13.512
58	Slack	1.028	-2.96	63.8	30.8
59	Tanjung	1.019	-6.177	47.4	22.957
60	Trisakti-70	1.006	-10.258	46.9	-105.772
61	Trisakti-150	0.986	-8.171	64.7	31.336
62	Ulin 70	0.936	-13.473	80.1	38.794

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.6**

No. Bus	Nama Bus	Tegangan		Daya yang Diserap	
		PU Volt	Angle (Deg)	MW	Mvar
63	Batulicin 1	1.007	0.888	37.5	18.162
64	Kota Baru 1	1.004	0.687	27	13.05
65	Amuntai	0.978	-9.134	26.2	12.689
66	Kuala Pambuang 1	0.988	-2.901	25.5	15.803
67	Asam Asam 2	1.034	3.424	11.7	5.667
68	Nangabulik 1	0.994	-1.788	4.7	3.525
69	Kasongan	1.001	-1.679	7.8	5.85
70	Kayutangi	0.994	-1.572	49.4	37.05
71	Kuala Kurun	1.013	-1.285	7.8	5.85
72	Mantuil	1.006	-1.358	52.4	39.3
73	Muara Teweh	1.014	1.448	17.4	8.427
74	New Palangkaraya	0.994	-1.796	4.3	3.225
Total				1134.40	366.3

**Tabel 4. 7 Hasil Aliran Daya Sistem**

Dari No.Bus	Ke No.Bus	Aliran Daya			Losses	
		MW	Mvar	MVA	MW	Mvar
1	58	68.409	3.342	68.49	0.071	3.537
2	67	50	6.139	50.376	0.023	3.128
3	67	50	6.139	50.376	0.023	3.128
4	67	50	6.139	50.376	0.023	3.128
5	67	50	6.139	50.376	0.023	3.128
6	34	8	0.41	8.011	0.004	0.202
7	34	8	0.41	8.011	0.004	0.202
8	35	30	1.721	30.049	0.009	1.102
9	35	30	1.721	30.049	0.009	1.102

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.7**

Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya			Losses	
		MW From	Mvar From	MVA From	MW Loss	Mvar Loss
10	38	4	1.943	4.447	0.003	0.128
11	61	70	12.754	71.152	0.112	6.749
12	55	100	12.843	100.821	0.136	8.131
13	55	45	10.932	46.309	0.014	1.714
14	41	45	15.306	47.532	0.031	1.856
15	41	40	14.925	42.694	0.036	1.498
16	42	60	2.851	60.068	0.026	3.4
17	42	60	2.851	60.068	0.026	3.4
18	67	75	8.61	75.493	0.044	5.269
19	67	65	8.042	65.496	0.033	3.966
20	70	25	4.03	25.323	0.011	1.09
21	70	25	4.03	25.323	0.011	1.09
22	59	15.6	3.624	16.015	0.009	0.963
23	64	4	0.969	4.116	0.001	0.111
24	64	4	0.969	4.116	0.001	0.111
25	66	2	0.623	2.095	0.007	0.065
26	66	2	0.623	2.095	0.007	0.065
27	70	7	0.785	7.044	0.017	0.314
28	52	45	2.003	45.045	0.022	2.64
29	52	45	2.003	45.045	0.022	2.64
30	72	30	2.662	30.118	0.024	1.185
31	61	15	3.659	15.44	0.021	0.953
32	72	20	1.277	20.041	0.031	1.575
33	72	20	1.015	20.026	0.046	1.244
34	6	-7.996	-0.209	7.999	0.004	0.202
34	7	-7.996	-0.209	7.999	0.004	0.202

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.7**

<b>Dari No. Bus</b>	<b>Ke No. Bus</b>	<b>Aliran Daya</b>			<b>Losses</b>	
		<b>MW From</b>	<b>Mvar From</b>	<b>MVA From</b>	<b>MW Loss</b>	<b>Mvar Loss</b>
34	35	14.187	-7.564	16.077	0.014	-8.757
34	45	1.805	7.981	8.183	0.021	-13.074
35	8	-29.991	-0.619	29.997	0.009	1.102
35	9	-29.991	-0.619	29.997	0.009	1.102
35	34	-14.173	-1.192	14.223	0.014	-8.757
35	53	74.155	2.43	74.194	0.091	-1.904
36	40	21.984	-19.302	29.256	0.126	-0.879
36	46	-57.485	2.108	57.524	0.187	-1.507
37	59	-92.579	-26.588	96.322	2.003	-3.509
37	54	29.185	1.672	29.233	0.212	-8.048
37	65	26.345	6.448	27.123	0.145	-6.241
37	44	-7.351	-3.035	7.953	0.029	-23.407
38	10	-3.997	-1.815	4.39	0.003	0.128
38	59	42.031	-2.814	42.125	0.229	-15.129
38	47	-58.233	-5.154	58.46	0.642	-21.551
39	40	-33.809	-13.65	36.46	0.019	1.927
39	62	22.208	8.032	23.616	0.303	-0.083
40	39	33.828	15.577	37.242	0.019	1.927
40	36	-21.858	18.423	28.586	0.126	-0.879
40	54	3.431	-3.148	4.656	0.004	-9.12
40	50	-92.401	27.63	96.443	4.955	8.323
41	14	-44.969	-13.45	46.937	0.031	1.856
41	15	-39.964	-13.427	42.16	0.036	1.498
41	59	84.933	26.877	89.085	0.344	-4.183
42	16	-59.974	0.549	59.977	0.026	3.4
42	17	-59.974	0.549	59.977	0.026	3.4

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.7**

<b>Dari No. Bus</b>	<b>Ke No. Bus</b>	<b>Aliran Daya</b>			<b>Losses</b>	
		<b>MW From</b>	<b>Mvar From</b>	<b>MVA From</b>	<b>MW Loss</b>	<b>Mvar Loss</b>
42	43	119.949	-1.097	119.954	0.854	-4.679
43	71	21.544	18.325	28.283	0.077	-9.162
43	45	8.8	-41.146	42.076	0.184	-25.128
43	42	-119.095	-3.582	119.149	0.854	-4.679
43	49	70.751	17.685	72.928	0.627	-11.451
44	55	-57.417	-5.685	57.698	0.491	-4.159
44	56	19.437	11.236	22.451	0.032	-5.723
44	37	7.38	-20.372	21.667	0.029	-23.407
44	55	-57.417	-5.685	57.698	0.491	-4.159
45	43	-8.617	16.018	18.188	0.184	-25.128
45	34	-1.784	-21.055	21.131	0.021	-13.074
46	61	-20.049	-33.493	39.035	0.133	-2.974
46	67	-103.124	18.73	104.811	8.361	14.925
46	36	57.672	-3.616	57.786	0.187	-1.507
46	56	3.7	-11.553	12.131	0.005	-5.782
47	58	-4.481	20.433	20.919	0.058	-10.561
47	38	58.875	-16.397	61.116	0.642	-21.551
47	53	-68.294	-10.768	69.138	0.37	-9.049
48	49	-36.143	-12.78	38.336	0.211	-0.719
48	57	4.842	-6.618	8.2	0.026	-6.181
49	43	-70.124	-29.136	75.936	0.627	-11.451
49	48	36.354	12.061	38.303	0.211	-0.719
49	51	-8.83	-3.557	9.519	0.029	-3.117
50	40	97.355	-19.307	99.251	4.955	8.323
50	67	-136.855	0.177	136.855	4.749	9.824
51	52	-89.814	-0.329	89.815	0.142	-1.604

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.7**

<b>Dari No. Bus</b>	<b>Ke No. Bus</b>	<b>Aliran Daya</b>			<b>Losses</b>	
		<b>MW From</b>	<b>Mvar From</b>	<b>MVA From</b>	<b>MW Loss</b>	<b>Mvar Loss</b>
51	57	71.555	-4.663	71.707	0.9	-4.744
51	49	8.859	0.44	8.87	0.029	-3.117
52	28	-44.978	0.637	44.983	0.022	2.64
52	29	-44.978	0.637	44.983	0.022	2.64
52	51	89.956	-1.275	89.965	0.142	-1.604
53	47	68.664	1.719	68.685	0.37	-9.049
53	35	-74.064	-4.335	74.19	0.091	-1.904
54	40	-3.427	-5.972	6.885	0.004	-9.12
54	37	-28.973	-9.72	30.56	0.212	-8.048
55	12	-99.864	-4.712	99.976	0.136	8.131
55	13	-44.986	-9.218	45.92	0.014	1.714
55	61	108.67	-12.395	109.375	0.868	-0.618
55	57	-46.528	12.788	48.254	1.044	-1.08
55	44	57.908	1.525	57.928	0.491	-4.159
56	46	-3.695	5.771	6.853	0.005	-5.782
56	44	-19.405	-16.959	25.771	0.032	-5.723
57	51	-70.655	-0.082	70.655	0.9	-4.744
57	48	-4.816	0.437	4.836	0.026	-6.181
57	55	47.572	-13.868	49.552	1.044	-1.08
58	1	-68.338	0.194	68.338	0.071	3.537
58	47	4.538	-30.994	31.325	0.058	-10.561
59	22	-15.591	-2.661	15.817	0.009	0.963
59	41	-84.59	-31.061	90.112	0.344	-4.183
59	38	-41.802	-12.315	43.578	0.229	-15.129
59	37	94.583	23.079	97.358	2.003	-3.509
60	61	-107.515	70.218	128.414	0.271	5.297

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.7**

<b>Dari No. Bus</b>	<b>Ke No. Bus</b>	<b>Aliran Daya</b>			<b>Losses</b>	
		<b>MW From</b>	<b>Mvar From</b>	<b>MVA From</b>	<b>MW Loss</b>	<b>Mvar Loss</b>
60	62	60.615	35.554	70.273	2.421	4.875
61	31	-14.979	-2.706	15.221	0.021	0.953
61	11	-69.888	-6.005	70.145	0.112	6.749
61	60	107.786	-64.921	125.828	0.271	5.297
61	55	-107.802	11.777	108.443	0.868	-0.618
61	46	20.182	30.519	36.588	0.133	-2.974
62	60	-58.195	-30.679	65.787	2.421	4.875
62	39	-21.905	-8.115	23.36	0.303	-0.083
63	73	-56.53	-22.028	60.67	0.213	-6.327
63	64	19.03	3.866	19.419	0.028	-7.468
64	24	-3.999	-0.858	4.09	0.001	0.111
64	23	-3.999	-0.858	4.09	0.001	0.111
64	63	-19.002	-11.334	22.125	0.028	-7.468
65	37	-26.2	-12.689	29.111	0.145	-6.241
66	25	-1.993	-0.558	2.07	0.007	0.065
66	26	-1.993	-0.558	2.07	0.007	0.065
66	72	-21.513	-14.688	26.049	0.281	-21.066
67	2	-49.977	-3.011	50.067	0.023	3.128
67	3	-49.977	-3.011	50.067	0.023	3.128
67	4	-49.977	-3.011	50.067	0.023	3.128
67	5	-49.977	-3.011	50.067	0.023	3.128
67	18	-74.956	-3.341	75.031	0.044	5.269
67	19	-64.967	-4.076	65.095	0.033	3.966
67	50	141.604	9.648	141.932	4.749	9.824
67	46	111.485	-3.805	111.55	8.361	14.925
67	73	75.04	7.953	75.46	0.897	-16.176

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.7**

<b>Dari No. Bus</b>	<b>Ke No. Bus</b>	<b>Aliran Daya</b>			<b>Losses</b>	
		<b>MW From</b>	<b>Mvar From</b>	<b>MVA From</b>	<b>MW Loss</b>	<b>Mvar Loss</b>
68	70	-4.7	-3.525	5.875	0.007	-10.765
69	70	1.482	3.628	3.919	0.028	-11.612
69	72	-9.282	-9.478	13.266	0.03	-11.758
70	20	-24.989	-2.94	25.161	0.011	1.09
70	21	-24.989	-2.94	25.161	0.011	1.09
70	27	-6.983	-0.471	6.999	0.017	0.314
70	69	-1.454	-15.239	15.308	0.028	-11.612
70	68	4.707	-7.24	8.636	0.007	-10.765
70	74	4.308	-8.22	9.281	0.008	-11.445
71	43	-21.467	-27.487	34.876	0.077	-9.162
71	72	13.667	21.637	25.592	0.059	-8.055
72	30	-29.976	-1.476	30.013	0.024	1.185
72	32	-19.969	0.297	19.971	0.031	1.575
72	33	-19.954	0.23	19.956	0.046	1.244
72	71	-13.607	-29.692	32.662	0.059	-8.055
72	69	9.313	-2.28	9.588	0.03	-11.758
72	66	21.794	-6.378	22.708	0.281	-21.066
73	63	56.743	15.701	58.875	0.213	-6.327
73	67	-74.143	-24.128	77.97	0.897	-16.176
74	70	-4.3	-3.225	5.375	0.008	-11.445

Tabel 4.5 dan 4.6 adalah tabel nilai pada bus generator dan bus beban. Tabel 4.7 adalah tabel aliran daya antar bus dan losses pada saluran. Dengan menggunakan data pada ketiga tabel tersebut dapat dihitung FVSI dari masing-masing saluran. Adapun hasilnya adalah seperti pada tabel 4.8.



**Tabel 4. 8** Tabel perhitungan FVSI saluran

<b>No Saluran</b>	<b>Dari Bus</b>	<b>Ke Bus</b>	<b>Nilai FVSI</b>
1	67	2	4.0345478
2	67	3	4.0349511
3	67	4	4.0349511
4	67	5	4.0349511
5	6	34	0.2578598
6	7	34	0.2578598
7	35	8	1.0077906
8	35	9	1.0077906
9	38	10	2.5154813
10	39	40	8.6606699
11	72	30	0.6960277
12	55	12	2.4646251
13	16	42	1.4325323
14	17	42	1.4325323
15	67	18	3.8202399
16	67	19	3.5682194
17	70	20	2.7405612
18	70	21	2.7405612
19	14	41	3.0180929
20	55	13	4.1927133
21	15	41	2.0612371
22	59	22	5.984976
23	64	24	2.533224
24	64	23	2.533224
25	66	25	0.3756644
26	66	26	0.3756644
27	70	27	0.3704259

Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.8**

<b>No Saluran</b>	<b>Dari Bus</b>	<b>Ke Bus</b>	<b>Nilai FVSI</b>
28	61	31	2.6351293
29	52	28	1.2506678
30	52	29	1.2506678
31	1	58	0.5041194
32	61	11	4.0816871
33	61	60	1.76961
34	72	32	1.0016707
35	72	33	0.344303
36	71	43	0.0644819
37	59	41	0.0519295
38	38	59	0.0163109
39	58	47	0.0777417
40	47	38	0.1372492
41	47	53	0.0060656
42	45	43	0.1454213
43	42	43	0.0029616
44	43	49	0.0898875
45	71	72	0.0687498
46	69	70	0.0293235
47	70	68	0.0268779
48	70	74	0.0261273
49	51	52	0.0010168
50	51	57	0.0215661
51	61	55	0.0237231
52	37	59	0.1255853
53	35	34	0.0226713
54	48	49	0.0515165

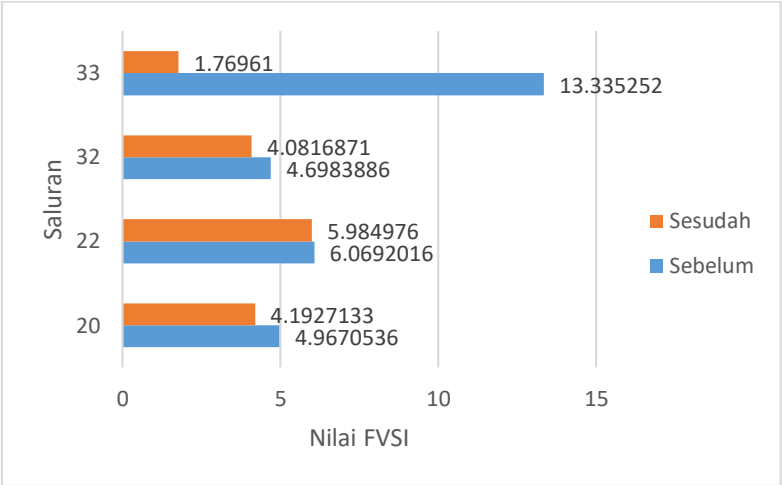
Tabel dilanjutkan pada halaman berikutnya

**Lanjutan Tabel 4.8**

No Saluran	Dari Bus	Ke Bus	Nilai FVSI
55	51	49	0.004652
56	57	48	0.0094644
57	55	57	0.1802083
58	72	69	0.0182455
59	62	60	0.4557414
60	62	39	0.1135321
61	46	61	0.0739055
62	40	36	0.0829303
63	40	54	0.0216957
64	54	37	0.0105059
65	50	40	0.2932879
66	67	50	0.067993
67	67	46	0.076615
68	63	73	0.0423215
69	73	67	0.0545714
70	36	46	0.0053512
71	37	65	0.0311659
72	44	55	0.0058375
73	56	46	0.0147546
74	44	56	0.0284934
75	37	44	0.0304747
76	45	34	0.0358817
77	53	35	0.0018208
78	64	63	0.0114984
79	66	72	0.0949571
Total			85.780341

Dengan melihat tabel 4.8 dapat kita amati bahwa saluran nomor 33 yaitu antara bus 60 dan 61 setelah pemasangan TCSC mengalami

penurunan nilai FVSI, yang semula sebesar 13.3352 turun menjadi 1.7696 seperti pada gambar 4.6. Hal ini membuktikan bahwa pemasangan TCSC dapat meningkatkan kestabilan tegangan dan menurunkan nilai FVSI dari sebuah saluran dan sistem secara keseluruhan.



**Gambar 4. 6** Perbandingan FVSI sebelum dan sesudah pemasangan TCSC pada saluran nomor 33

**Tabel 4. 9** Tabel Perbandingan Tegangan dan Sudut Fasa Bus Sebelum dan Sesudah Pemasangan TCSC

No Bus	Tegangan Sebelum Dipasang TCSC (p.u)	Sudut Fasa Sebelum Dipasang TCSC (°)	Tegangan Sesudah Dipasang TCSC (p.u)	Sudut Fasa Sesudah Dipasang TCSC (°)
11	1	-2.577	1	-2.755
13	1	-4.857	1	-4.973
22	1.032	-2.827	1.032	-2.783
55	0.99	-6.934	0.992	-7.048
59	1.019	-6.221	1.019	-6.177
60	1.035	-13.51	1.006	-10.258
61	0.983	-8.004	0.986	-8.171

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil perhitungan aliran daya pada kondisi beban normal, nilai *Fast Voltage Stability Index* (FVSI) yang cukup besar berada pada saluran nomor 33 yaitu 13.3352 dengan total FVSI keseluruhan sebesar 95.1701.
2. Dengan pemasangan TCSC sebesar -0.67222 pada saluran nomor 33 dapat memperbaiki Nilai FVSI pada saluran menjadi 1.7696 dan total FVSI semua saluran menjadi 85.7803.
3. Dengan pemasangan TCSC pada saluran nomor 33 dapat memperbaiki profil daya pada Bus 60, yang semula hanya mampu menopang beban sebesar 300 MW dengan tegangan 0.9 p.u. dapat meningkat menjadi sebesar 378 MW untuk tegangan yang sama.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan simulasi ini adalah sebagai berikut:

1. Pembuatan kurva P-V perlu ditelaah lebih lanjut karena tidak mampu membentuk kurva yang menyentuh titik 0 Tegangan. Hal ini dikarenakan membutuhkan metode prediktor-korektor yang merupakan analisis aliran daya tingkat lanjut daripada metode *Newton-Raphson* yang banyak digunakan pada kondisi steady state saja.
2. Perlu sebuah pengembangan untuk menentukan kestabilan sistem berdasarkan faktor-faktor lain, misalnya faktor kontingensi, pertumbuhan beban, perubahan konfigurasi saluran, batas daya yang dapat ditransmisikan setiap saluran, dan lain-lain.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alfarizy, " *Optimal Placement of Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) and Static Var Compensator (SVC) using Quantum Behaved Particle Swarm Optimization (QPSO) for Maximum Loadability*" Undergraduate Final Project, Dept. Electrical Engineering., Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, 2012.
- [2] Jebaraj " *Performance Evaluation of TCSC and SVC on Voltage Stability Limit Improvement and Loss Minimization under Most Critical Line Outaged Condition*". International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). ISSN: 2248-9622. Vol. 2, Issue 3, May-Jun 2012, pp.3083-3090
- [3] H. Saadat, *Power system analysis*. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1999.
- [4] Ontoseno Penangsang, *Analisis Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik*. Surabaya: ITSPRESS, 2012.
- [5] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [6] I. Musirin and T. K. Abdul Rahman, " *Novel fast voltage stability index (FVSI) for voltage stability analysis in power transmission system*,". Student Conference on Research and Development, SCOReD 2002, 2002, pp. 265-268.
- [7] Rani Manisha, Gupta Anju, " *Steady State Voltage Stability Enhancement of Power System Using FACTS Device*," IEEE, 2014.
- [8] A. R. Phadke, S. K. Bansal, and K. R. Niazi, " *A Comparison of Voltage Stability Indices for Placing Shunt FACTS Controllers*," presented at the Emerging Trends in Engineering and Technology, 2008. ICETET '08. First International Conference on, Nagpur, Maharashtra, India, 2008, pp. 939-944.
- [9] C. Reis and F. P. M. Barbosa, " *Indicators for Voltage Collapse Margins*," presented at the Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific, Chengdu, China, 2010, pp. 1-4.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nama : Rizqi Aditya Pradana  
NRP : 07111545000059  
TTL : Jember, 14-5-1992  
Agama : Islam  
Alamat : Wuluhan, Jember  
Telp/HP : 08123385968  
E-mail : rizqi.pradana@gmail.com

### RIWAYAT PENDIDIKAN

- 1998 – 2004 : SDN Dukuhdempok 1 Wuluhan
- 2004 – 2007 : SMP Negeri 1 Wuluhan
- 2007 – 2009 : SMA Negeri 1 Jember
- 2011 – 2015 : D3 T. Elektro FTI  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
- 2015 – Sekarang : S1 T. Elektro FTE bidang studi Sistem Tenaga  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

### PENGALAMAN KERJA

- Kerja Praktek di PT. EFOREL Indonesia, Bandung
- Kerja Praktek di PT. IPMOMI unit 3&4, Paiton

### PENGALAMAN ORGANISASI

- Staff Ristek HIMAD3TEKTRO (Himpunan Mahasiswa D3 T. ELEKTRO) ITS ( 2012 – 2013)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*